

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Акустики та акустоелектроніки
(повна назва кафедри)

_____ ДІДКОВСЬКИЙ В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 20 p.

зі спеціальності (спеціалізації) 6.050803 Акустотехніка
(код та назва спеціальності)

на тему: Особливості імпедансних характеристик двухчастотного сигналу в мілкому морі

Виконала: студентка 4 курсу, групи ДГ-51
(шифр групи)

 Ніжинська Валерія В'ячеславівна
 (прізвище, ім'я, по батькові) _____ (підпис)

Керівник проф., д.т.н., проф. Коржик О.В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ електроніки _____
(повна назва)

Кафедра _____ акустики та акустoeлектроніки _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 6.050803 Акустотехніка _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дідковський В.С.
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект (роботу) студенту

_____ Ніжинська Валерія В'ячеславівна _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Особливості імпедансних характеристик двух-частотного сигналу в мілкому морі

керівник проекту (роботи) _____ проф., д.т.н., проф. Коржик О.В. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

1. Кількість робочих частот дві f_1 і f_2 _____

2. Глибини моря 20-200м _____

3. Тип границь комбіновані _____

4. Модельна ситуація – плоско-паралельний регулярний хвилевід _____

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) _____

1. Аналіз науково-технічної літератури _____

2. Виведення аналітичних співвідношень, що відповідають умовам проведення експерименту _____

3. Створення алгоритму та програми обчислення в середовищі MatLab _____

4. Пошук пар частот за допомогою створеної програми _____

5. Аналіз та обробка отриманих результатів. Написання та оформлення пояснювальної записки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 5 вересня 2018 р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Збір матеріалів для роботи. Аналіз науково-технічної літератури.	25.09.2018 - 15.10.2018	
2	Виведення аналітичних співвідношень, що відповідають умовам проведення експерименту	16.10.18 - 20.11.18	
3	Створення алгоритму та програми обчислення в середовищі MatLab	20.12.18 - 10.03.19	
4	Пошук пар частот за допомогою створеної програми. Аналіз та обробка отриманих результатів	15.03.19 - 19.05.19	
5	Оформлення пояснювальної записки та презентації.	20.05.19 - 10.06.19	

Студент

(підпис)

В.В. Ніжинська
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

О.В. Коржик
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Особливості імпедансних характеристик двухчастотного сигналу в мілкому морі // Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр». Ніжинська В. В. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», факультет електроніки, кафедра акустики та акустoeлектроніки, група ДГ-51. – К.:НТУУ «КПІ», 2019. с. – 53, рис. – 17.

Метою роботи є дослідження імпедансних характеристик хвильоводу, що представляє мілке море при озвучуванні робочого середовища двочастотним акустичним сигналом при представленні сигналу джерела як двочастотних сигналів.

В роботі розглянуто імпедансні характеристики хвильоводу з комбінованими границями при розповсюдженні в ньому хвильового пакету в вигляді двухчастотного сигналу. В результаті вирішення задачі визначення питомих акустичних опорів вздовж осі Ox та Oz .

Ключові слова: *імпеданс, питомий акустичний опір, мілке море, двухчастотний пакет.*

ABSTRACT

Determination of the acoustic center of the traffic flow for evaluation the effectiveness of noise protection screens // Thesis for a degree of higher education "Bachelor". Telenga A. National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, Faculty of Electronics, Department of acoustics and acoustoelectronics, group DG-51. - K: NTUU "KPI", 2018. p. - 53, fig. – 17.

The purpose of the work is a study of the impedance characteristics of a waveguide representing a shallow water when sounding a working medium by a two-frequency acoustic signal when the source signal is represented as dual-frequency signals.

The paper deals with the impedance characteristics of a waveguide with combined boundaries when propagating a wave packet in it as a two-frequency signal. As a result of solving the problem of determining the specific acoustic resistance along the axis Ox and Oz

Key words: *impedance, specific acoustic resistance, shallow sea, twofold package.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ІМПЕДАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВИХ КАНАЛІВ З КОМБІНОВАНИМИ ГРАНИЦЯМИ	10
1.1. Аналіз теоретичного підґрунтя проблеми визначення імпедансних характеристик звукових каналів з комбінованими границями	10
1.1.1. Поширення акустичних хвиль в мілкому морі.....	10
1.1.2. Огляд проблеми групової швидкості.....	13
1.2. Визначення напрямку дослідження	16
РОЗДІЛ 2. ЗАДАЧА ВИЗНАЧЕННЯ ІМПЕДАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК В УМОВАХ ПЛОСКО-ПАРАЛЕЛЬНОГО, РЕГУЛЯРНОГО ХВИЛЕВОДА	17
2.1. Постановка задачі	17
2.2. Основні аналітичні співвідношення розв'язку задачі поширення та визначення імпедансних характеристик звукового повідомлення двочастотного характеру.....	18
2.2.1. Основні аналітичні співвідношення для визначення імпедансу вздовж осі Ox	20
2.2.2. Основні аналітичні співвідношення для визначення імпедансу вздовж осі Oz	23
2.3. Умови проведення чисельних досліджень	25
РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЧИСЕЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	26
3.1. Алгоритм програми розрахунку імпедансних характеристик	26
3.2. Програма чисельних досліджень.....	30
3.3. Чисельні дослідження залежності імпедансних характеристик від зміни величин	31
3.3.1. Визначення залежності імпедансних характеристик від зміни дистанції.....	37

3.3.2. Визначення залежності імпедансних характеристик від зміни глибини.....	42
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	46
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	48

ВСТУП

Поширення акустичних хвиль в мілкому морі відрізняється фундаментально від аналогічного явища, що відбувається в глибокому морі; через чималу відстані від морського дна в першому випадку, де наявність двох областей, що обмежують водний шар, є причиною, по якій розподіл акустичного тиску, викликаного джерелом гармонік, має інтерференційну природу в результаті багатопроменевого поширення акустичного сигналу. Ці інтерференційні властивості акустичного поля в шарі води, обмеженому вільною поверхнею з одної сторони та дном з іншої, проявляються шляхом формування ряду хвильових мод. З цієї причини ми маємо справу з груповою швидкістю при обговоренні поширення хвильових мод. Вплив морської поверхні має вигляд амплітудних і фазових коливань акустичного сигналу, в той час як нижня поверхня поглинає частину акустичної енергії. Масштаби розсіювального ефекту, що виникає на вільній поверхні, а також на морському дні, залежать від відношення довжини хвилі до характерних розмірів нерівномірностей (критерій Релея).

Визначення «мілкого моря» було прийнято в відповідність критерію $h < 10 \lambda$, який зазвичай наводиться в літературі. Проте, в деяких роботах також запропоновано інші критерії. Наприклад, В. А. Куперман і Дж. Ф. Лінч [5] зазначають: «Для мілкого моря, що має границі по поверхні і дну, типовим є співвідношення глибина до довжини хвилі, яке становить близько 10-100». Як можна помітити виходячи з характеристики критерію $h < 10 \lambda$, для чутних частот море буде вважатися мілким, коли його глибина складає близько тисяч метрів, в порівнянні з сантиметрами для ультразвукових частот.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ІМПЕДАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВИХ КАНАЛІВ З КОМБІНОВАНИМИ ГРАНИЦЯМИ

1.1. Аналіз теоретичного підґрунтя проблеми визначення імпедансних характеристик звукових каналів з комбінованими границями

1.1.1. Поширення акустичних хвиль в мілкому морі

Особливість поширення акустичного збурення в мілкому морі, які описуються близькістю меж граничних середовищ, характеризуються різними імпедансними властивостями, що впливають на акустичне поле. Такі середовища називаються дисперсійними середовищами, їх дослідження представлені в роботах [6], [7].

Аналіз розподілу акустичного поля в мілкому морі – складна проблема, яку важко поставити в рамки математичної моделі. Замінивши мілке море на плоску акустичну систему і за умови, що граничні поверхні напів просторів, що обмежують водний шар, паралельні один з одним ми зможемо визначити збурення акустичного поля в такому шарі.

Необхідно мати на увазі фізичні спрощення, представлені цією моделлю мілкого моря. Зазвичай вільна поверхня є стохастично визначена, а не площина. Нижня поверхня також визначається випадковим чином. Рішення окремих випадків цього питання можна знайти в [6], [8]- [10].

Проблема поширення акустичних збурень в середовищі зазвичай вирішується використанням методів або хвильової акустики, або геометричної акустики. Обидва підходи дозволяють вирішити проблему поширення акустичних збурень в шарі води, і приводять до однієї самої формули, яка описує потенціал швидкості звуку.

$$\varphi(R) = \frac{2\pi i}{h} e^{i\frac{\pi}{4}} \sum_{n=0}^{\infty} \cos \frac{\pi}{h} \left(n + \frac{1}{2} \right) z_0 \cos \frac{\pi}{h} \left(n + \frac{1}{2} \right) z \sqrt{\frac{2}{\pi k_n r}} e^{ik_n r}, \quad (1.1)$$

$$\text{де } k_m = k \sqrt{1 - \left[\frac{c}{\omega} \frac{\pi}{h} \left(n + \frac{1}{2} \right) \right]^2} \quad (1.2)$$

$\omega = 2\pi f$ - кругова частота, h - глибина водного шару, k - хвильове число, z_0 - глибина джерела звуку нульового порядку, n - номер моди, z та r - вертикальна та горизонтальна координати, відповідно.

Формула (1) представляє собою серію хвильових мод, які розповсюджуються вздовж шару з різними груповими швидкостями, які визначаються

$$u_n = \frac{d\omega}{dk_m} = c \sqrt{1 - \left[\frac{c}{\omega} \frac{\pi}{h} \left(n + \frac{1}{2} \right) \right]^2} \quad (1.3)$$

Хвильова мода n -го типу зможе розповсюджуватися в шарі глибиною h без сильного затухання при дотриманні умови

$$k_m \geq 0 \quad (1.4)$$

З неї випливає і обмеження на довжину хвилі, що може розповсюджуватися в шарі глибиною h

$$\lambda \leq 4h \quad (1.5)$$

Враховуючи граничні умови

$$\left. \frac{\partial p(r, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad \text{при } 0 < r < \infty$$

$$p(r, z) \Big|_{z=h} = 0 \quad (1.6)$$

Отже шар являє собою акустичний хвилевід, в якому акустичні збурення поширюються в вигляді хвильових мод. Такий хвилевід є класичним прикладом дисперсійного середовища другого роду.

Випадки розповсюдження акустичних хвиль, що генеруються джерелом нульового порядку, зазначених вище, відповідає ідеалізованим умовам. Введені спрощення стосувалися, зокрема, нижньої половини простору. В дійсності, морське дно з властивостями, близькими до цих як ідеально жорстке середовище – швидше виняток [13], [14], [15]. В той же час припущення дозволяє нам спростити ефекти на границі «вода-повітря», як правило, завжди дійсні, так як акустичний імпеданс приблизно в 3500 разів більший акустичного імпедансу повітря [8], [16].

На нижній границі системи ситуація різниться, так як акустичний імпеданс морського дна як правило, близький до акустичного імпедансу води. В випадку піщаного морського дна, акустичний імпеданс води всього в чотири рази нижче акустичного імпедансу морського дна. Для мулового та глинистого дна це співвідношення ще нижче. Тому деяка частина акустичної енергії буде передаватися з шару воду в дно, що призведе до зниження рівня акустичного тиску зі збільшенням відстані. Далі будуть наведені теоретичні співвідношення, які приведуть до схеми падіння акустичного тиску відмінного від отриманого за формулою.

Після деяких перетворень, описаних в роботі [17], отримаємо:

$$\varphi(R) = \frac{2\pi i}{h} \sum_{n=0}^{\infty} \cos \frac{\pi}{h} \left(n + \frac{1}{2} \right) z_0 \cos \frac{\pi}{h} \left(n + \frac{1}{2} \right) z e^{\frac{i\pi}{4}} \sqrt{\frac{2}{\pi k_m r}} e^{ik_m r} e^{-\delta_{2n} r}, \quad (1.7)$$

Де

$$\delta_{2n} = \frac{-\pi \left(n + \frac{1}{2} \right)}{h} \frac{\ln |\hat{b}_1(\alpha_n^\circ)|}{2 \sqrt{(hk)^2 - \left[\pi \left(n + \frac{1}{2} \right) \right]^2}}, \quad (1.8)$$

$$\hat{b}_1(\theta) = \frac{m \cos \theta - \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta}}{m \cos \theta + \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta}}, \quad (1.9)$$

$$a_n^{\circ} = \arcsin \frac{\pi \left(n + \frac{1}{2} \right)}{kh}. \quad (1.10)$$

Вплив властивостей морського дна на розповсюдження акустичної хвилі міститься в виразі $-\delta_{2n}r$. Вираз (1.7), модуль коефіцієнта відбиття, що містить множник гіперболічної функції, який можна прирівняти до 1. Це дозволяє нам отримати прості представлення хвильових мод, що розповсюджуються вздовж глибинного шару. Тим не менш, фактичне значення коефіцієнту відбиття, що відповідає за загасання окремих хвильових мод відображені в показнику експоненти.

Співвідношення (1.7) описує акустичне поле, що створюється точковим джерелом нульового порядку. Порівнявши його з (1.1), ми бачимо, що він включає в себе додаткові умови, які представляють зменшення акустичного потенціалу зі збільшенням відстані. Це зменшення більше, ніж передбачено в формулі (1.1).

Вищезазначені похідні співвідношення, зокрема результати, до яких вони призводять, будуть в подальшому використовуватися в чисельному дослідженні впливу характеристик хвилеводу на акустичне поле, та співставленні з результатами розрахунків в експерименті.

1.1.2. Огляд проблеми групової швидкості

Ґрунтуючись на визначені з джерела [18] «хвильовим пакетом можна вважати сигнал кінцевої тривалості, частотний спектр, якого, в зв'язку з цим, немонохроматичний». Кожна частотна складова пакету деякого певного профілю, взята після розкладення в ряд Фур'є з часовим множником, який відповідає кореню дисперсійного рівняння, за рахунок відмінностей фазових швидкостей компонент пакету, надходить в точку спостереження в різні моменти часу. Таким чином, інтерференція різних за частотою «розфазованих коливань» призводить до зміни в точці спостереження форми профіля вихідного хвильового пакету. При цьому [18], в випадку «значної крутизни фронтів» пакета, швидкість розповсюдження приблизно можна описати груповою швидкістю v_{gr} . Однак, групова швидкість (в відповідності з кінематичним тлумаченням), характеризує швидкість руху обвідної (профіля) переданого хвильовим пакетом і чим ширший спектр пакету – тим більше спотворення зазнає сигнал, тим менше впевненість в тому, що саме він досяг точки спостереження і, відповідно, - тим гірше v_{gr} описує швидкість розповсюдження повідомлення. Підсумовуючи можна сказати, що кінематичне тлумачення v_{gr} , яке відповідає ситуації гармонічного характеру, стає недостовірним. Зазначимо, що в [18] був запропонований термін «швидкість сигналу», який тим краще описує швидкість приходу сигналу в точку спостереження, чим більш вузькосмуговим є сигнал та чим різкіша зміна амплітуди його обвідної.

Розглянувши роботу [19] Л. Брілюєна можна виділити деякі проаналізовані ним поняття стосовно швидкості сигналу:

- «Групова» швидкість за Релеєм [20], визначена як коливання близьких частот, що «рухаються одна за одною в регулярній послідовності» або «швидкість групи хвиль», яка «менша швидкості окремих хвиль, що утворюють групу», представлену «накладанням нескінчених послідовностей хвиль не суттєво відмінних за довжиною хвилі». Головною складністю в цьому випадку вважається врахування форми самої групи.

Припущення Релея в цій області, свого часу, не були оцінені відповідним чином, в силу експериментальних труднощів.

- «Сигнальна» швидкість за Зоммерфельдом [21] (або «швидкість сигналу» v_{usc} за [18]) подана в вигляді припущення про те, що v_{ep} може наближено відповідати швидкості фінітних сигналів. Дане визначення швидкості сигналу v_{usc} пов'язане з співвідношенням $v_{usc} = \frac{x}{t}$, де t – час розповсюдження пакету від джерела до точки прийому за фактом прибуття. Тут критерієм прибуття є фіксація «максимальної інтенсивності головного сигналу» на відміну від певного моменту прибуття «екстримально малих» складових сигналу (чи наявність передвісників), що пов'язується з v_{ep} , тобто, встановлення різниці між цими швидкостями. Хоча, в подальшому було визнано, що визначення «швидкості через середовище кінцевого сигналу» викликає складнощі, які пов'язані зі зміною форми сигналу та труднощами розмежування v_{ep} і v_{usc} .

Як перше, так і друге поняття орієнтовані на ситуацію малої відмінності частот, які входять до складу групи. Тим не менш, для будь яких співвідношень довжин хвиль групи та швидкостей складових хвиль – для двох джерел з довжиною хвилі λ_1 , λ_2 та фазовими швидкостями $v_{\phi 1}$, $v_{\phi 2}$ справедливим залишається співвідношення [1] вигляду:

$$v_{ep} = v_{\phi 2} - \lambda_2 \frac{v_{\phi 1} - v_{\phi 2}}{\lambda_1 - \lambda_2},$$

яке є базовим з точки зору загального тлумачення групової швидкості.

- Швидкість «перетворення (переносу, передачі) енергії». Це поняття вдало походить від введенного Л. А. Вайнштейном [22] терміну «центр енергії»:

$$x_e = \frac{\int x E dx}{\int E dx},$$

де E – густина енергії, для котрого швидкість центра енергії визначається як $v_e = \frac{dx_e}{dt}$. При цьому в області низьких частот швидкості v_{gp} і v_e співпадають (якщо, дисперсія мала). В загальному випадку, за даними [18], точний розрахунок сигналу в точці прийому – неможливий, тому пропонується введення та використання терміну «ефективна групова швидкість» $v_{ef\,gp}$ також орієнтоване на збереження форми пакету або його малі зміни. Варто згадати роботу [23], в якій відмічено, що «розмір пакету і його тривалість пов’язані з v_{gp} » та вказано, що дисперсія може призводити до зміни напрямку руху хвильового пакету в однорідному середовищі. Однак, зміна напрямку руху компонент пакету не завжди призводить до зміни напрямку руху його енергетичного центру, що пов’язано з неможливістю точного визначення його місцезнаходження в вигляді деформації пакету при розповсюдженні.

Таке різноманітне тлумачення поняття швидкості розповсюдження складних сигналів в умовах частотної дисперсії спонукає виділити наступні умови, які можуть безпосередньо впливати на якість передачі звукових повідомлень по хвилеводу:

- зміна форми обвідної та характеру частотного наповнення пакету при його розповсюдженні;
- виключення ролі передвісників;
- вибір центру енергії сигналу як інтегральної величини на проміжках спостереження сигналу;
- встановлення особливостей енергетичних характеристик акустичного поля, пов’язаних зі швидкістю розповсюдження хвильового пакету.

1.2. Визначення напрямку дослідження

Задача визначення особливостей формування акустичних полів в хвильоводах розглядається в основоположних дослідженнях проблеми розповсюдження гармонічних коливань в акустичних хвильоводах та були вивчені М. А. Ісаковичем [1], М. І. Карновським [2], С. Н. Ржевкіним [3], Р. Дж. Урик [4]. В задачах представлення мілкого моря , як хвильоводу вздовж якого розповсюджуються звукові сигнали, широкого застосування набули такі параметри хвиль, як питомий акустичний опір робочого середовища, що створюється хвильовими навантаженнями, які розглядаються в напрямку координатних осей хвильоводу та на границях розподілу середовищ.

Не можна не зазначити, що розвиток теорії нерегулярних хвильоводів відбувався і за рахунок заміни ідеально відбиваючих границь – границями з деякими проміжними значеннями опору, а також, не без участі, появи певних питань щодо розповсюдження імпульсних сигналів. Зокрема, останнє пов'язували з неминучою деформацією імпульсного повідомлення, що передається, по часовій та частотній областях, а також зміна форми, тривалості і частотного складу на шляху слідування. В зв'язку з цим необхідно зазначити роботи В. Т. Грінченко, В. В. Мелашко [11], [12] та такі роботи як [24]-[26].

Тим не менш, питання оцінки імпедансних характеристик полів, що утворюються складними сигналами, постійно перебувають в процесі дослідження та розвитку. При цьому, таку зацікавленість даною темою можна пояснити бажанням уточнення ситуації розподілу по каналу хвильоводу густини акустичної енергії. Отже можна сказати, що напрям досліджень представлений надалі є актуальним та потребує ґрунтовного вивчення, а метою роботи є ні що інше як визначення особливостей питомого акустичного опору хвиль, що розповсюджуються в плоско-паралельному хвильоводі з комбінованими границями, джерелом яких є двочастотний сигнал.

РОЗДІЛ 2. ЗАДАЧА ВИЗНАЧЕННЯ ІМПЕДАНСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК В УМОВАХ ПЛОСКО-ПАРАЛЕЛЬНОГО, РЕГУЛЯРНОГО ХВИЛЕВОДА

2.1. Постановка задачі

Розглянемо, відтворюючий мілке море, плоско-паралельний хвилевід з комбінованими границями: акустично жорсткою границею, абсолютно відбиваючим – «вода-дно» та акустично м'якою границею – «вода-повітря» (Рис.1.). Хвилевід орієнтований в прямокутній системі координат xOz так, що вісь Ox співпадає з границею розподілу «вода-дно», Oz - вертикальна вісь, \vec{n} - вектор нормалі. В перетині хвилеводу $x=0$, розміщений двочастотне джерело, яке формує повідомлення в вигляді комбінації двох звукових хвиль з частотами ω_1 та ω_2 ($\omega_2 > \omega_1$), які за значенням більші критичної частоти відповідної моди хвилеводу.

При заданих значення висоти хвилеводу, густини середовища, швидкості звуку в ньому визначити та здобути аналітичні вирази для залежності імпедансу від відповідних величин, дослідити за допомогою графіків особливості імпедансних характеристик.

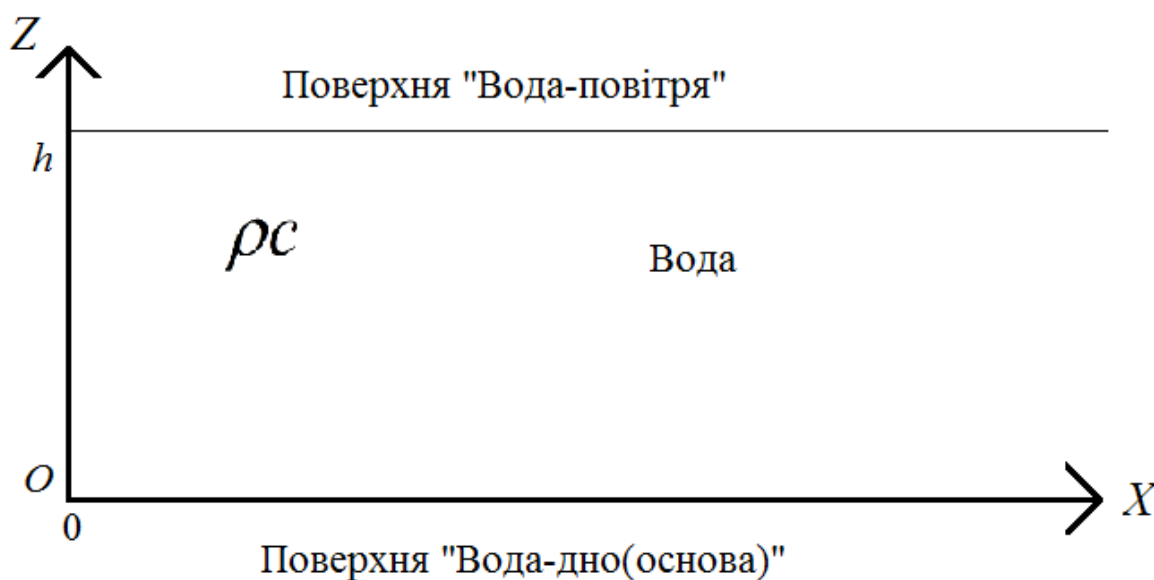


Рис.1. Хвилеводне представлення мілкового моря

2.2. Основні аналітичні співвідношення розв'язку задачі поширення та визначення імпедансних характеристик звукового повідомлення двочастотного характеру

В обраних умовах формування акустичного поля в хвилеводі потенціал швидкості $\varphi_n(x, z, t)$ для n -ої нормальної хвилі ($n=0,1,2$), що створюється деяким монохроматичним джерелом в відповідності до [1], [2], [11], [12] може бути представлений в вигляді

$$\varphi_n(x, z, t) = A_n \cos \left[\frac{(2n+1)\pi}{2h} z \right] e^{-i(\omega t - k_n x)}, \quad (2.1)$$

де A_n - коефіцієнт, який визначається джерелом; h - глибина моря; k_n - хвильове число n -ої нормальної хвилі, k - хвильове число для вільного поля:

$$\begin{aligned} k_n &= k \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{нкр}}{\omega} \right)^2}; \\ \omega_{нкр} &= \frac{\pi(2n+1)c}{h}; \\ k &= \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \end{aligned}, \quad (2.2)$$

де $\omega_{нкр}$ - критична частота, $\omega = 2\pi f$ - кругова частота, c - швидкість звуку в вільному середовищі. Використання формули Ейлера та формул переходу (наприклад, [1], [2], [11], [12]) від потенціалу швидкості до тиску p_n та компонент коливальної швидкості v_{nx} , v_{nz} , для хвиль I, II з частотами ω_1 та ω_2 , відповідно, приводять (2.1) до вигляду:

$$\begin{aligned} p_n^I(x, z, t) &= -i\omega_I \rho A_n \cos \left[\frac{(2n+1)\pi}{2h} z \right] e^{-i(\omega_I t - k_n^I x)}, \\ p_n^{II}(x, z, t) &= -i\omega_{II} \rho A_n \cos \left[\frac{(2n+1)\pi}{2h} z \right] e^{-i(\omega_{II} t - k_n^{II} x)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_{nx}^I(x, z, t) &= -ik_n^I A_n \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h} z\right] e^{-i(\omega_I t - k_n^I x)}, \\
v_{nx}^{II}(x, z, t) &= -ik_n^{II} A_n \cos\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h} z\right] e^{-i(\omega_{II} t - k_n^{II} x)}, \\
v_{nz}^I(x, z, t) &= A_n \left(\frac{(2n+1)\pi}{2h}\right) \sin\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h} z\right] e^{-i(\omega_I t - k_n^I x)}, \\
v_{nz}^{II}(x, z, t) &= A_n \left(\frac{(2n+1)\pi}{2h}\right) \sin\left[\frac{(2n+1)\pi}{2h} z\right] e^{-i(\omega_{II} t - k_n^{II} x)}.
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Хвилі I, II, які створює джерело, співнаправлені, а хвильове число для відповідних частот ω_1 та ω_2 записується як:

$$k_n^I = k^I \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{nkp}}{\omega_I}\right)^2}, \quad k_n^{II} = k^{II} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_{nkp}}{\omega_{II}}\right)^2}.$$

Для такої ситуації, необхідно визначити питомий акустичний опір z_{nx} в напрямку розповсюдження хвилі (вісь Ox) та z_{nz} - вздовж Oz .

2.2.1. Основні аналітичні співвідношення для визначення імпедансу вздовж осі

Ox

З групи рівнянь (2.3), використовуючи середні по часовому проміжку

спостереження $T = \frac{2\pi}{(\omega_{II} - \omega_I)}$ значення суперпозиції тиску

$p_n(x, z, t) = p_n^I(x, z, t) + p_n^{II}(x, z, t)$ і відповідних компонент фазової швидкості

$v_{nx}(x, z, t) = v_{nx}^I(x, z, t) + v_{nx}^{II}(x, z, t)$ вигляду:

$$\begin{aligned}\bar{p}_n(x, z) &= \frac{1}{T} \int_0^T p_n^I(x, z, t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T p_n^{II}(x, z, t) dt \\ \bar{v}_n(x, z) &= \frac{1}{T} \int_0^T v_n^I(x, z, t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T v_n^{II}(x, z, t) dt\end{aligned}\quad (2.4)$$

Визначимо імпеданс z_{nx} як:

$$z_{nx} = \frac{\bar{p}_n(x, z)}{\bar{v}_n(x, z)}.\quad (2.5)$$

В виразі (2.5):

$$\begin{aligned}\bar{p}_n(x, z) &= A_n \rho \cos(a_n z) \left[B_I(\omega_I) e^{-i\left(\frac{\omega_I T}{2}\right)} e^{i\left(k_n^I x - \frac{\pi}{2}\right)} + B_{II}(\omega_{II}) e^{-i\left(\frac{\omega_{II} T}{2}\right)} e^{i\left(k_n^{II} x - \frac{\pi}{2}\right)} \right] \\ \bar{v}_n(x, z) &= A_n \cos(a_n z) \left[C_I(\omega_I) e^{-i\left(\frac{\omega_I T}{2}\right)} e^{i\left(k_n^I x - \frac{\pi}{2}\right)} + C_{II}(\omega_{II}) e^{-i\left(\frac{\omega_{II} T}{2}\right)} e^{i\left(k_n^{II} x - \frac{\pi}{2}\right)} \right]\end{aligned}\quad (2.6)$$

де ρ - густина води, а деякі вирази дорівнюють :

$$a_n = \frac{\pi(2n+1)}{2h},$$

$$B_I(\omega_I) = \omega_I \left(\frac{\sin\left(\frac{\omega_I T}{2}\right)}{\frac{\omega_I T}{2}} \right),$$

$$\begin{aligned}
B_{II}(\omega_{II}) &= \omega_{II} \left(\frac{\sin\left(\frac{\omega_{II}T}{2}\right)}{\frac{\omega_{II}T}{2}} \right), \\
C_I(\omega_I) &= k_n^I \left(\frac{\sin\left(\frac{\omega_I T}{2}\right)}{\frac{\omega_I T}{2}} \right), \\
C_{II}(\omega_{II}) &= k_n^{II} \left(\frac{\sin\left(\frac{\omega_{II}T}{2}\right)}{\frac{\omega_{II}T}{2}} \right).
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Після підстановки (2.6) в (2.5), з урахуванням (2.7) та формул Ейлера, для імпедансу z_{nx} отримаємо:

$$\begin{aligned}
z_{nx}(x) &= \rho \frac{\left[B_I(\omega_I) \sin(\alpha_I(x)) + B_{II}(\omega_{II}) \sin(\alpha_{II}(x)) \right] +}{\left[C_I(\omega_I) \sin(\alpha_I(x)) + C_{II}(\omega_{II}) \sin(\alpha_{II}(x)) \right] +} \\
&+ i \frac{\left[B_I(\omega_I) \cos(\alpha_I(x)) + B_{II}(\omega_{II}) \cos(\alpha_{II}(x)) \right]}{\left[C_I(\omega_I) \cos(\alpha_I(x)) + C_{II}(\omega_{II}) \cos(\alpha_{II}(x)) \right]} \tag{2.8}
\end{aligned}$$

де $\alpha_I(x) = \frac{\omega_I T}{2} - k_n^I x$, $\alpha_{II}(x) = \frac{\omega_{II} T}{2} - k_n^{II} x$, а дорівнює: $\Delta\alpha(x) = \alpha_I(x) - \alpha_{II}(x)$.

Далі, використовуючи експоненційне представлення чисельника та знаменника виразу (2.8), і розділивши результати на дійсну та уявну частини отримаємо:

$$z_{nx}(x) = \rho \frac{\tilde{R}(x)}{\tilde{Q}(x)} \cos(\Delta\gamma(x)) + i \rho \frac{\tilde{R}(x)}{\tilde{Q}(x)} \sin(\Delta\gamma(x)), \tag{2.9}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{R}(x) &= \sqrt{R_I^2 + R_{II}^2 + 2R_I R_{II} \cos(\Delta\alpha(x))}, \\
\tilde{Q}(x) &= \sqrt{Q_I^2 + Q_{II}^2 + 2Q_I Q_{II} \cos(\Delta\alpha(x))}, \\
R_I &= B_I(\omega_I), \\
R_{II} &= B_{II}(\omega_{II}), \\
Q_I &= C_I(\omega_I), \\
Q_{II} &= C_{II}(\omega_{II}), \\
\Delta\gamma(x) &= -\gamma_{II}(x) + \gamma_I(x), \\
\gamma_I(x) &= \arctg \left[\frac{R_I \cos(\alpha_I(x)) + R_{II} \cos(\alpha_{II}(x))}{R_I \sin(\alpha_I(x)) + R_{II} \sin(\alpha_{II}(x))} \right], \\
\gamma_{II}(x) &= \arctg \left[\frac{Q_I \sin(\alpha_I(x)) + Q_{II} \sin(\alpha_{II}(x))}{Q_I \cos(\alpha_I(x)) + Q_{II} \cos(\alpha_{II}(x))} \right].
\end{aligned} \tag{2.10}$$

2.2.2. Основні аналітичні співвідношення для визначення імпедансу вздовж осі

Oz

З групи рівнянь (2.3), використовуючи середнє по часовому проміжку спостереження (T) значення суперпозиції по тиску

$$p_n(x, z, t) = p_n^I(x, z, t) + p_n^{II}(x, z, t)$$

та відповідний компонент фазової швидкості

$$v_{nz}(x, z, t) = v_{nz}^I(x, z, t) + v_{nz}^{II}(x, z, t)$$

вигляду:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{nz}(x, z) &= \frac{1}{T} \int_0^T p_n^I(x, z, t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T p_n^{II}(x, z, t) dt \\ \bar{v}_{nz}(x, z) &= \frac{1}{T} \int_0^T v_n^I(x, z, t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T v_n^{II}(x, z, t) dt \end{aligned} \quad , \quad (2.11)$$

визначимо імпеданс $z_{nz}(x, z) = z_{nz}(z) \Big|_{x=const}$ як::

$$z_{nz}(z) = \frac{\bar{p}_{nz}(x, z)}{\bar{v}_{nz}(x, z)} \Big|_{x=const} . \quad (2.12)$$

Зберігаючи вираз для тиску (2.6), використовуючи вираз для $v_{nz}^I(x, z, t)$, $v_{nz}^{II}(x, z, t)$ з групи (2.3), а також інтеграли (2.11), визначення з (2.6), (2.7) та заміну

$$\tilde{D}(x) = \sqrt{D_I^2 + D_{II}^2 + 2D_I D_{II} \cos(\Delta\alpha(x))},$$

де

$$D_I(\omega_I) = a_n \left(\frac{\sin\left(\frac{\omega_I T}{2}\right)}{\frac{\omega_I T}{2}} \right), \quad D_{II}(\omega_{II}) = a_n \left(\frac{\sin\left(\frac{\omega_{II} T}{2}\right)}{\frac{\omega_{II} T}{2}} \right),$$

після аналогічних (2.6)-(2.10) перетворень приходимо до запису імпедансу в перетині $x = \text{const}$ вздовж осі Oz :

$$\begin{aligned} z_{nz}(x, z) \Big|_{x=\text{const}} &= z_{nz}(z) = \\ &= \rho \frac{\tilde{R}(x)}{\tilde{D}(x)} \cos(\Delta\psi(x)) \operatorname{ctg}(a_n z) \Big|_{x=\text{const}} + i \rho \frac{\tilde{R}(x)}{\tilde{D}(x)} \sin(\Delta\psi(x)) \operatorname{ctg}(a_n z) \Big|_{x=\text{const}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\Delta\psi(x) = -\psi_{II}(x) + \gamma_I(x),$$

$$\psi_{II}(x) = \operatorname{arctg} \left[\frac{D_I \sin(\alpha_I(x)) + D_{II} \sin(\alpha_{II}(x))}{D_I \cos(\alpha_I(x)) + D_{II} \cos(\alpha_{II}(x))} \right]. \quad (2.14)$$

2.3. Умови проведення чисельних досліджень

Даний експеримент проведено за допомогою програмного забезпечення MatLab. В його середовищі реалізовано модель хвилеводу з комбінованими границями, що характеризує верхню границю розподілу, «вода-повітря», як акустично м'яку (питомий опір повітря набагато менший питомого опору води) та нижню границю розподілу середовищ «вода-дно», як акустично жорстку.

Хвилевід заповнений водою при нормальних умовах, а саме такі, що визначені IUPAC, як нормальний тиск у 10^5 Па та температура 0°C (273°K), що в свою чергу визначає густину води $1000\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ та швидкість звуку у воді $1500\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

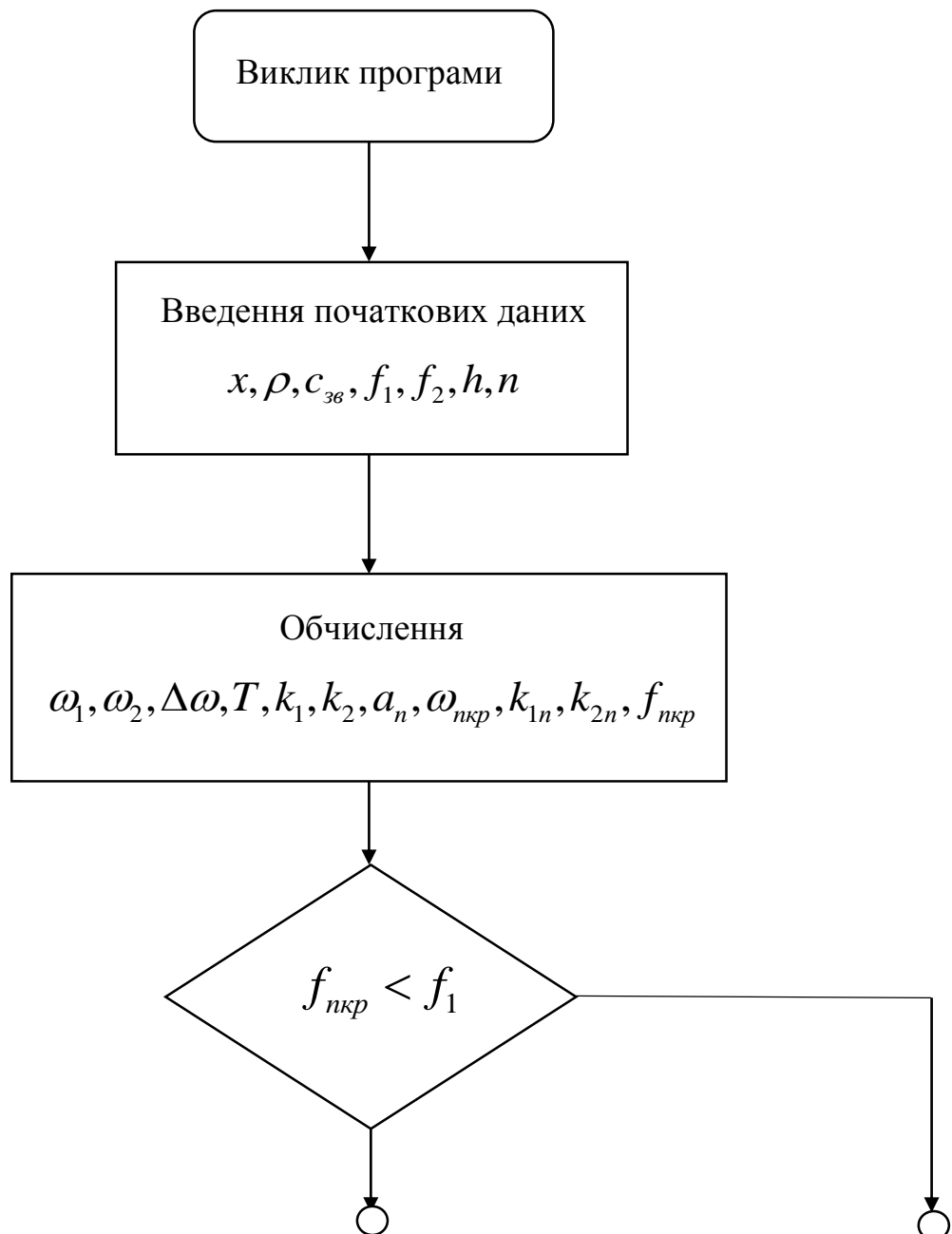
Висота хвилеводу була обрана $h=55\text{м}$ для першої половини досліджень (3.3.1.), а в другій половині (3.3.2.) експеримент проведено зі зміною висоти хвилеводу для додаткових величин $h=85\text{м}$, $h=115\text{м}$. Всі дослідження проводяться на першій моді коливань.

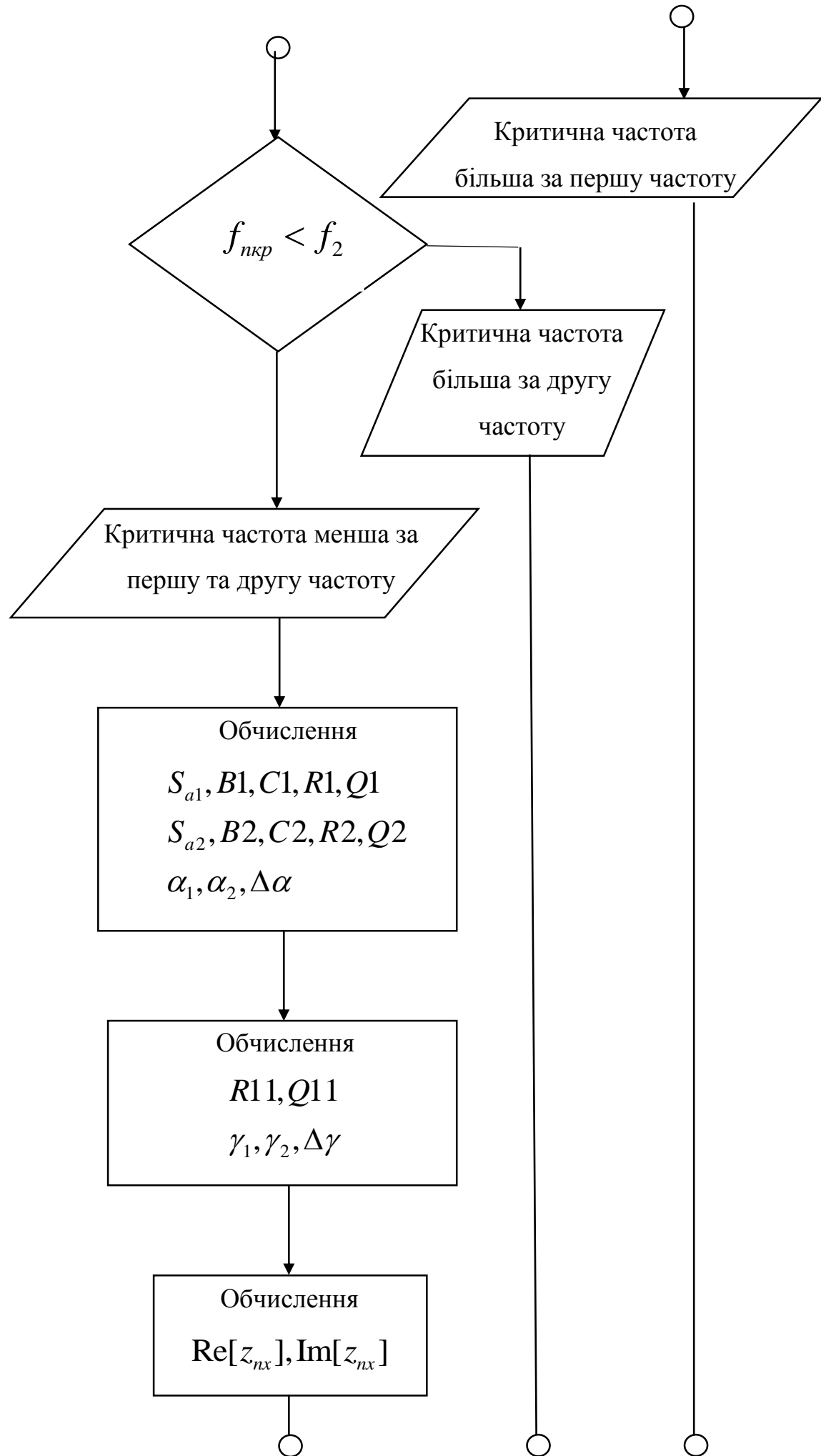
Частоти для дослідження були обрані дослідницьким чином з області нижніх фундаментальних частот, таким чином щоб відображати найбільш сприятливу для передачі сигналу картину. Результати обчислень будуть наведені для двох пар частот, а саме пари $f_1=90$ і $f_2=125$ та пари $f_1=67$ і $f_2=79$. На виході програми будуть представлені графіки залежності імпедансу, його дійсної і уявної частини та фази при зміні дистанції та висоти хвилеводу.

РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЧИСЕЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Алгоритм програми розрахунку імпедансних характеристик

В програмному забезпеченні MatLab було розроблено алгоритм обчислення для проведення чисельних досліджень, з подальшою побудовою відповідних графіків та отримання числових значень певних величин. В процесі розробки використовувалися дані та формули зазначені в Розділі 2. Нижче наведено алгоритм роботи програми, який поділено на декілька частин: безпосереднє обчислення необхідних співвідношень за заданими параметрами для z_{nx} і z_{nz} та алгоритми побудови відповідних графіків.





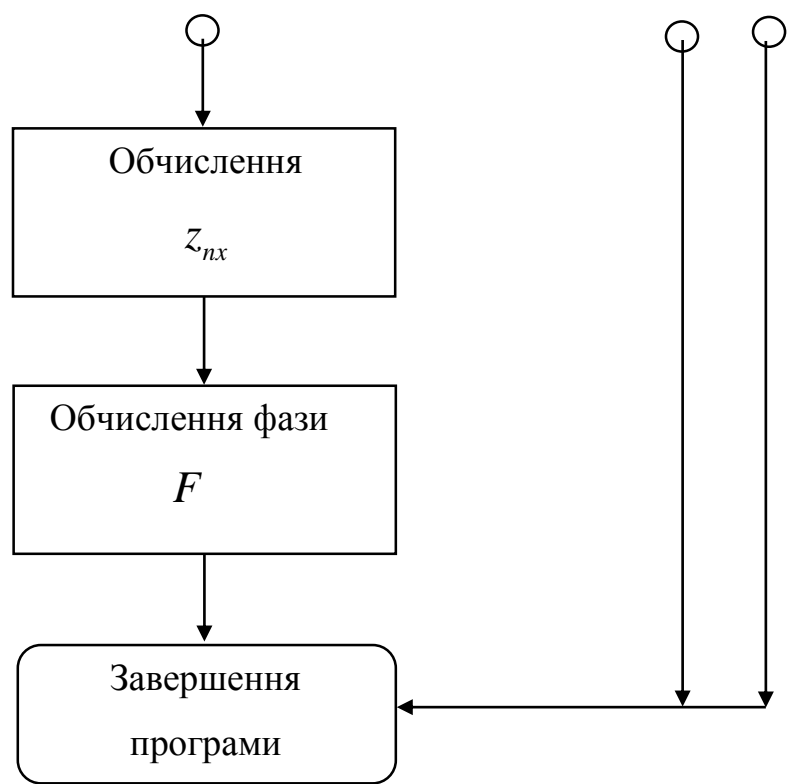


Рис.2. Блок-схема обчислення z_{nx}

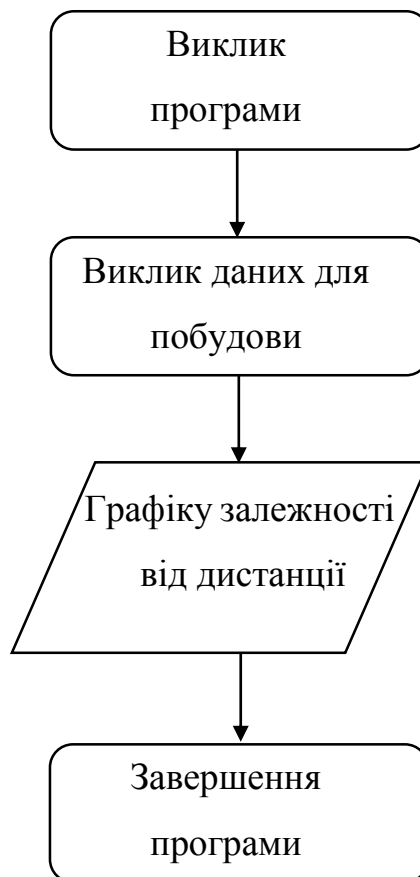
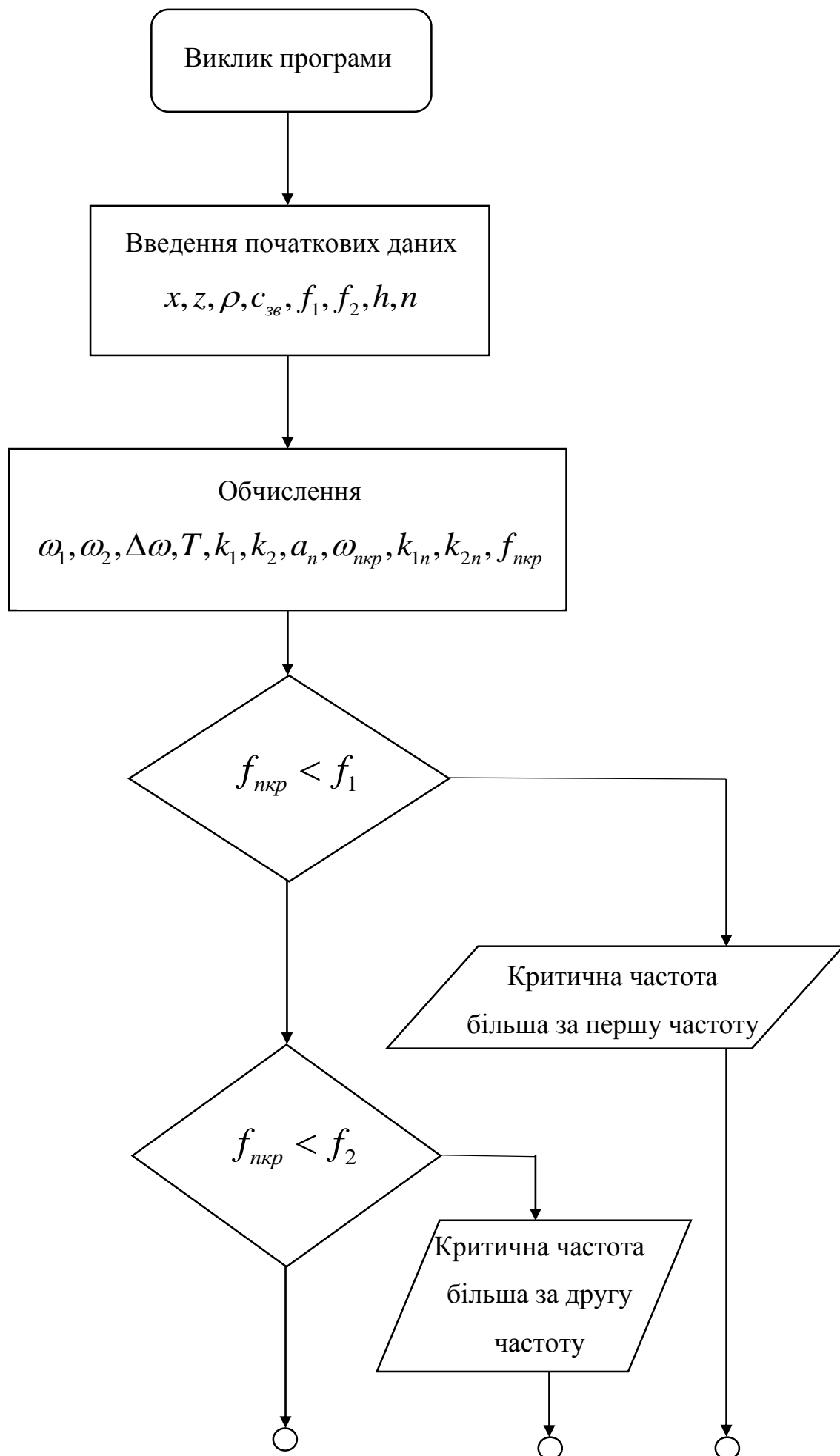


Рис.3. Блок-схема алгоритму побудови графіків



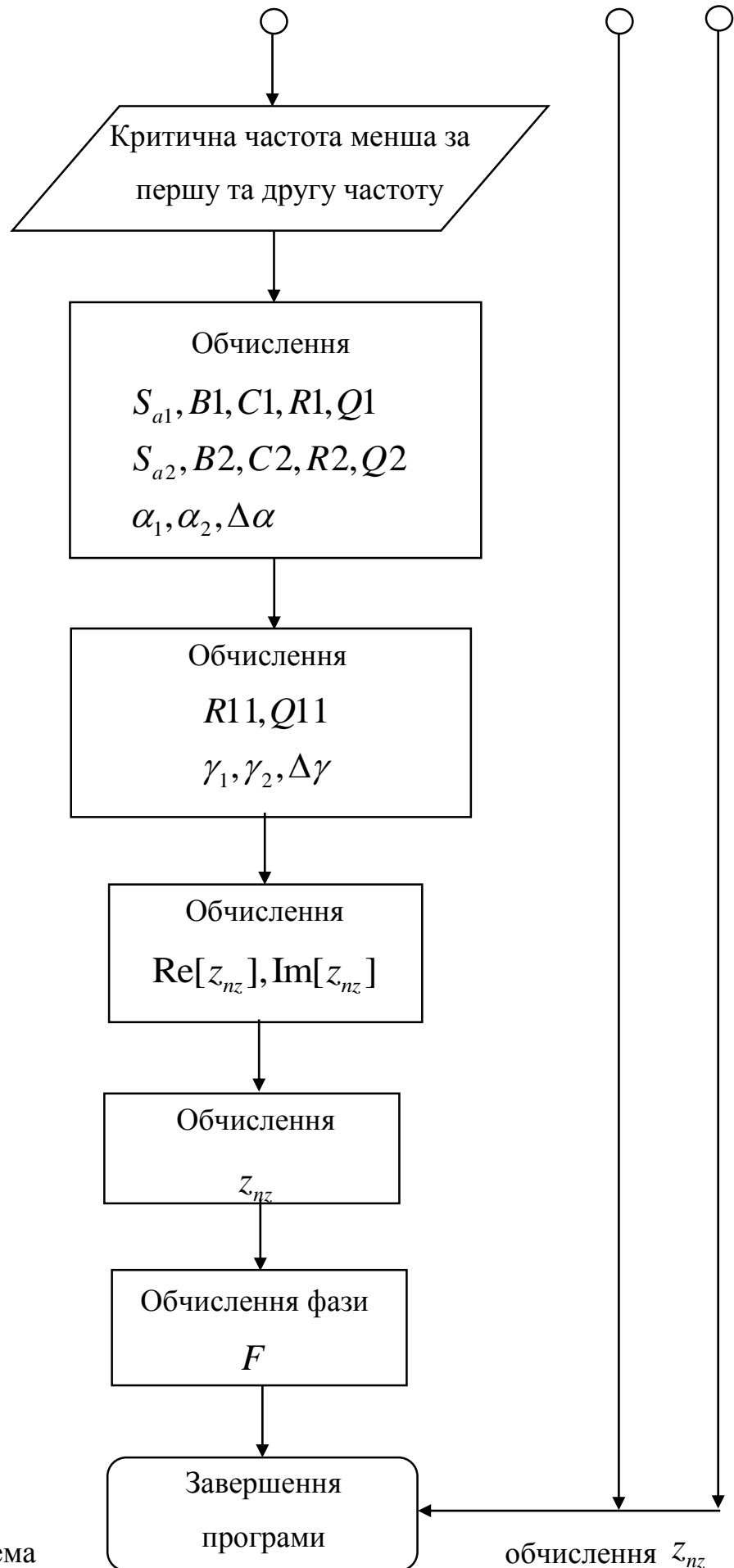


Рис.4. Блок-схема

3.2. Програма чисельних досліджень

В даному розділі наводиться лістинг з програмного забезпечення MatLab в якому наведено розроблену програму обчислення для проведення чисельних досліджень, з подальшою побудовою графіків.

Розглянемо більш детально програму на основі аналітичних виразів для обчислення та аналізу імпедансних характеристик вздовж осі Ох:

- 1) Розпочнемо програму з введення початкових даних з розділу 2.3.

```
%%% Введення початкових даних
x=0:2000;           % дистанція
ro=1000;            % густина води
czv=1500;           % швидкість звуку у воді
f1=90;              % перша частота
f2=125;             % друга частота
h=55;               % висота хвильоводу
n=1;                % номер моди
```

- 2) Виконаємо всі необхідні розрахунки такі, як знаходження хвильового числа для кожної частоти, хвильового числа n-ої моди для кожної частоти (2.2), часовий проміжок спостереження.

```
w1=2*pi*f1;
w2=2*pi*f2;

dw=w2-w1;
t=(2*pi)/(dw);      % період
k1=w1/czv;           % хвильове число для першої частоти
k2=w2/czv;           % хвильове число для другої частоти
an=((2*n+1)*pi)/(2*h);
wnkr=((2*n+1)*pi*czv)/(2*h); % w критична
k1n=k1*(sqrt(1-(wnkr/w1)^2));
k2n=k2*(sqrt(1-(wnkr/w2)^2));
fnkr=wnkr/(2*pi);    % критична частота
```

- 3) Проведемо аналіз, згідно обчисленої критичної частоти. За допомогою оператора if забезпечимо поінформованість в разі перевищення критичною частотою, двох заданих частот розповсюдження сигналу.

```
%%% Аналіз критичної частоти

if fnkr>f1
    disp("Критична частота більша за першу частоту")
elseif fnkr>f2
    disp("Критична частота більша за другу частоту")
else
    disp("Критична частота менша за першу та другу частоту")
end
```

- 4) Подальші обчислення потребують введення заміни деяких змінних за для компактнішого запису та пришвидшення розрахунків. Всі заміни були проведені згідно (2.7).

%%% Введення замін

```
Sa1=sin((w1*t)/2)/((w1*t)/2);  
B1=w1*Sa1;  
C1=k1n*Sa1;  
R1=B1; Q1=C1;
```

```
Sa2=sin((w2*t)/2)/((w2*t)/2);  
B2=w2*Sa2;  
C2=k2n*Sa2;  
R2=B2; Q2=C2;
```

```
L1=k1n.*x;  
L2=k2n.*x;  
dL=L1-L2;
```

- 5) Проведемо виокремлення виразів, що необхідні для подальшого розрахунку дійсної та уявної частини імпедансу вздовж осі Oх

%%% Виділення виразів для обрахунку дійсної та уявної частини (2.10)

```
R11=sqrt(R1^2+R2^2+2*R1*R2.*cos(dL));  
Q11=sqrt(Q1^2+Q2^2+2*Q1*Q2.*cos(dL));  
  
g1=atan((-1)*((R1.*cos(L1)+R2.*cos(L2))./(R1.*sin(L1)+R2.*sin(L2))));  
g2=atan((-1)*((Q1.*cos(L1)+Q2.*cos(L2))./(Q1.*sin(L1)+Q2.*sin(L2))));  
dg=-g2+g1;
```

- 6) Обчислимо дійсну та уявну частини імпедансу вздовж осі Oх використовуючи попередні спрощення

%%% Обчислення реальної та уявної частини

```
Rezn=(ro/(ro*czv)).*((R11.*cos(dg))./Q11);  
Imzn=(ro/(ro*czv)).*((R11.*sin(dg))./Q11);
```

- 7) Обчислимо імпеданс вздовж осі Oх

%%% Обчислення імпедансу

```
IS=ro.*sqrt(Rezn.^2+Imzn.^2);  
ISX=IS./1043;
```

- 8) Обчислимо фазу

%%% Обчислення фази

```
F=atan(Imzn./Rezn);
```

- 9) Далі будуть наведенні побудови графіків відповідних залежностей функцій від координат вздовж осі Oх, враховуючи обчислення зазначені вище

%%% Побудова графіків

10) Залежність імпедансу від координат вздовж осі Ох

%% Побудова залежності імпедансу від дистанції при f1=90 та f2=125

```
plot(x, ISX);  
grid on;  
title('Залежність імпедансу від дистанції при f1=90 та f2=125 ');  
xlabel ('x');  
ylabel ('Znx');
```

11) Залежність дійсної та уявної частини імпедансу від координат вздовж осі Ох

%% Побудова залежності реальної та уявної частини імпедансу від дистанції при f1=90 та f2=125

```
plot(x, Rezn);  
grid on;  
title('Залежність реальної та уявної частини імпедансу від дистанції при f1=90 та f2=125 ');  
xlabel ('x');  
ylabel ('Rezn, Imzn');  
hold on;  
  
plot(x, Imzn);  
hold on;
```

12) Залежність фази від координат вздовж осі Ох

%% Побудова залежності фази від дистанції при f1=90 та f2=125

```
plot(x, F);  
grid on;  
title('Залежність фази від дистанції при f1=90 та f2=125 ');  
xlabel ('x');  
ylabel ('F');  
hold on;
```

13) Побудова картини розповсюдження трьох сигналів, окремо кожної частоти та спільного

%% Побудова трьох сигналів

```
Sig1=cos(L1);  
Sig2=cos(L2);  
Sig3=cos(dL);  
  
plot(x, Sig1);  
grid on;  
title('Залежність трьох сигналів від дистанції при f1=90 та f2=125 ');  
xlabel ('x');  
ylabel ('cos(L1), cos(L2), cos(dL)');  
hold on;  
  
plot(x, Sig2);  
hold on;  
  
plot(x, Sig3);  
hold on;
```

Розглянемо більш детально програму на основі аналітичних виразів для обчислення та аналізу імпедансних характеристик вздовж осі Oz:

1) Розпочнемо програму з введення початкових даних з розділу 2.3.

```
%%% Введемо початкові дані

x=0; % дистанція
z=0:55; % глибина
ro=1000; % густина води
czv=1500; % швидкість звуку у воді
f1=90; % перша частота
f2=125; % друга частота
h=55; % висота хвилеводу
n=1; % номер моди
```

2) Виконаємо всі необхідні розрахунки такі, як знаходження хвильового числа для кожної частоти, хвильового числа n-ої моди для кожної частоти (2.2), часовий проміжок спостереження.

```
w1=2*pi*f1;
w2=2*pi*f2;
dw=w2-w1;
t=(2*pi)/(dw); % період
k1=w1/czv; % хвильове число для першої частоти
k2=w2/czv; % хвильове число для другої частоти
an=((2*n+1)*pi)/(2*h);
wnkr=((2*n+1)*pi*czv)/(2*h); % w критична
k1n=k1*(sqrt(1-(wnkr/w1)^2));
k2n=k2*(sqrt(1-(wnkr/w2)^2));
fnkr=wnkr/(2*pi) % критична частота
```

3) Проведемо аналіз, згідно обрахованої критичної частоти. За допомогою оператора if забезпечимо поінформованість в разі перевищення критичною частотою, двох заданих частот розповсюдження сигналу.

```
%%% Аналіз критичної частоти

if fnkr>f1
    disp("Критична частота більша за першу частоту")
elseif fnkr>f2
    disp("Критична частота більша за другу частоту")
else
    disp("Критична частота менша за першу та другу частоту")
end
```

4) Подальші обчислення потребують введення заміни деяких змінних за для компактнішого запису та пришвидшення розрахунків. Всі заміни були проведені згідно (2.7) з урахуванням аналізу по осі Oz

```
%%% Введення замін

Sa1=sin((w1*t)/2)/((w1*t)/2);
```

```

B1=w1*Sa1;
C1=k1n*Sa1;
R1=B1; Q1=Sa1*an;

Sa2=sin((w2*t)/2)/((w2*t)/2);
B2=w2*Sa2;
C2=k2n*Sa2;
R2=B2; Q2=Sa1*an;

L1=((w1*t)/2)*(-k1n)*x;
L2=((w2*t)/2)*(-k2n)*x;
dL=L2-L1;

```

5) Проведемо виокремлення виразів, що необхідні для подальшого розрахунку дійсної та уявної частини імпедансу вздовж осі Oz

%% Виділення виразів для обрахунку реальної та уявної частини

```

R11=sqrt(R1^2+R2^2+2*R1*R2*cos(dL));
Q11=sqrt(Q1^2+Q2^2+2*Q1*Q2*cos(dL));

g1=atan((-1)*((R1*cos(L1)+R2*cos(L2))/(R1*sin(L1)+R2*sin(L2))));
g2=atan((-1)*((Q1*sin(L1)+Q2*sin(L2))/(Q1*cos(L1)+Q2*cos(L2))));
dg=-g2+g1;

```

6) Обчислимо дійсну та уявну частини імпедансу вздовж осі Oz використовуючи попередні спрощення

%% Обчислення реальної та уявної частини

```

Rezn=(ro/(ro*czv)).*((R11*cos(dg)).*cot(an.*z))./Q11;
Imzn=(ro/(ro*czv)).*((R11*sin(dg)).*cot(an.*z))./Q11;

```

7) Обчислимо імпеданс вздовж осі Oz

%% Обчислення імпедансу

```

IS=((ro.*cot(an.*z))./(ro*czv)).*sqrt(Rezn.^2+Imzn.^2);

```

8) Обчислимо фазу

%% Обчислення фази

```

F=atan(Imzn./Rezn);

```

9) Обчислимо тиск та швидкість по осі Oz

%% Обчислення тиску та швидкості по Oz

```

p=cos(an.*z);
v=sin(an.*z);

```

10) Далі будуть наведенні побудови графіків відповідних залежностей функцій від координат вздовж осі Oz, враховуючи обчислення зазначені вище

%% Побудова графіків

11) Залежність імпедансу від координат вздовж осі Oz

%%% Побудова залежності імпедансу від глибини

```
plot(z, IS);  
grid on;  
title('Залежність імпедансу від глибини при f1=90 та f2=125 ');  
xlabel ('z');  
ylabel ('Znz');
```

12) Залежність дійсної та уявної частини імпедансу від координат вздовж осі Oz

%%% Побудова залежності реальної та уявної частини імпедансу від глибини

```
plot(z, Rezn);  
grid on;  
title('Залежність реальної та уявної частини імпедансу від глибини при f1=90 та f2=125 ');  
xlabel ('z');  
ylabel ('Rezn, Imzn');  
hold on;  
  
plot(z, Imzn);  
hold on;
```

13) Залежність фази від координат вздовж осі Ox

%%% Побудова залежності фази від глибини

```
plot(z, F);  
grid on;  
title('Залежність фази від глибини при f1=90 та f2=125 ');  
xlabel ('z');  
ylabel ('F');
```

14) Залежність тиску та швидкості від координат вздовж осі Oz

%%% Побудова залежності тиску та швидкості від глибини

```
plot(z, p);  
grid on;  
title('Залежність тиску та швидкості від глибини при f1=90 та f2=125 ');  
xlabel ('z');  
ylabel ('p, v');  
hold on;  
  
plot(z, v);  
hold on;
```

3.3. Чисельні дослідження залежності імпедансних характеристик від зміни величин

3.3.1. Визначення залежності імпедансних характеристик від дистанції

В даному розділі наведені результати роботи програми для визначення особливостей імпедансних характеристик для різних пар частот при зміні дистанції, тобто координати по осі Ox . При цьому дослідження будуть проведені для постійних значень моди та висоти хвилеводу $n=1$ $h=55$, а більш детальна залежність від цих характеристик буде досліджена в наступному підрозділі.

Для кожної пари частот, результати будуть мати по 5 графіків, а саме пари $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$ та пари $f_1 = 67$ і $f_2 = 79$.

1. Дослідження пари частот $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$

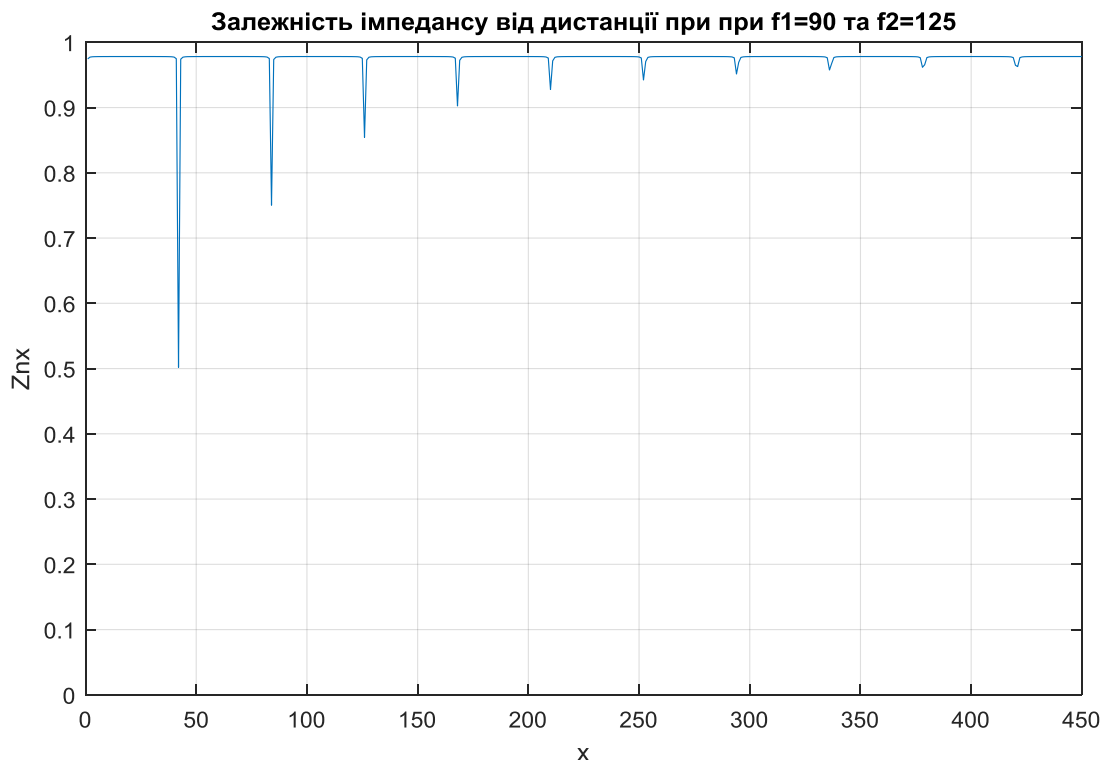


Рис.5. Залежність імпедансу Z_{nx} від дистанції

Залежність дійсної та уявної частини імпедансу від дистанції при $f_1=90$ та $f_2=125$

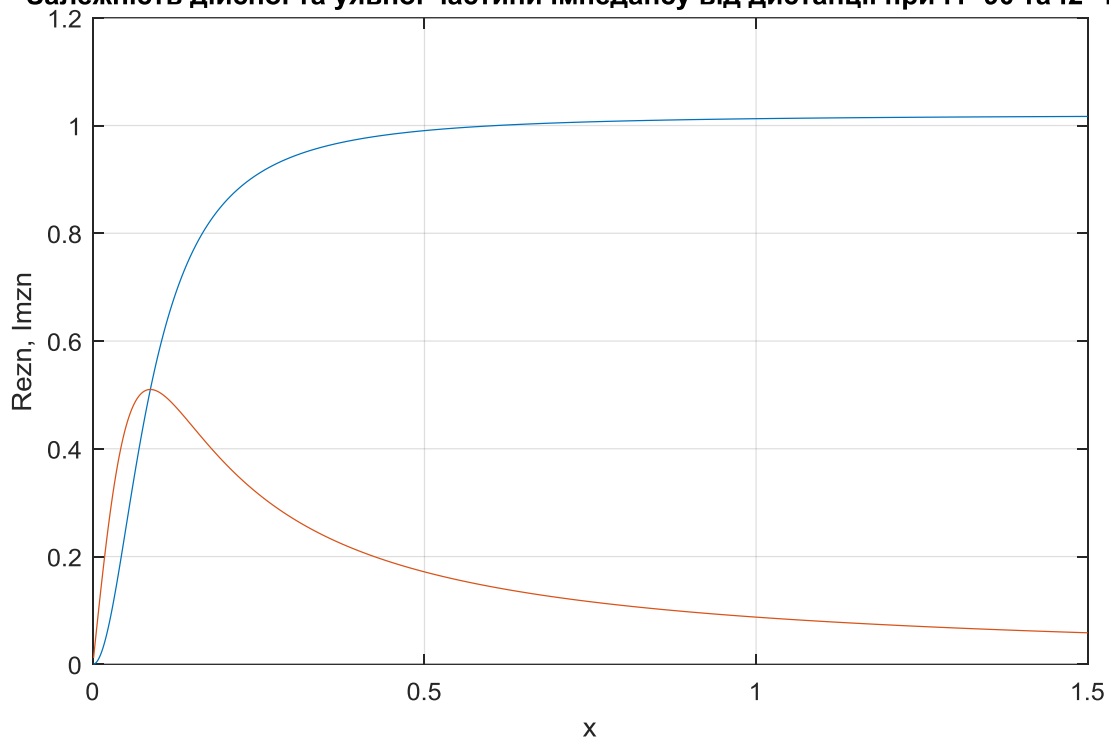


Рис.6. Залежність дійсної (синій) та уявної (червоний) частини імпедансу z_{nx} від дистанції

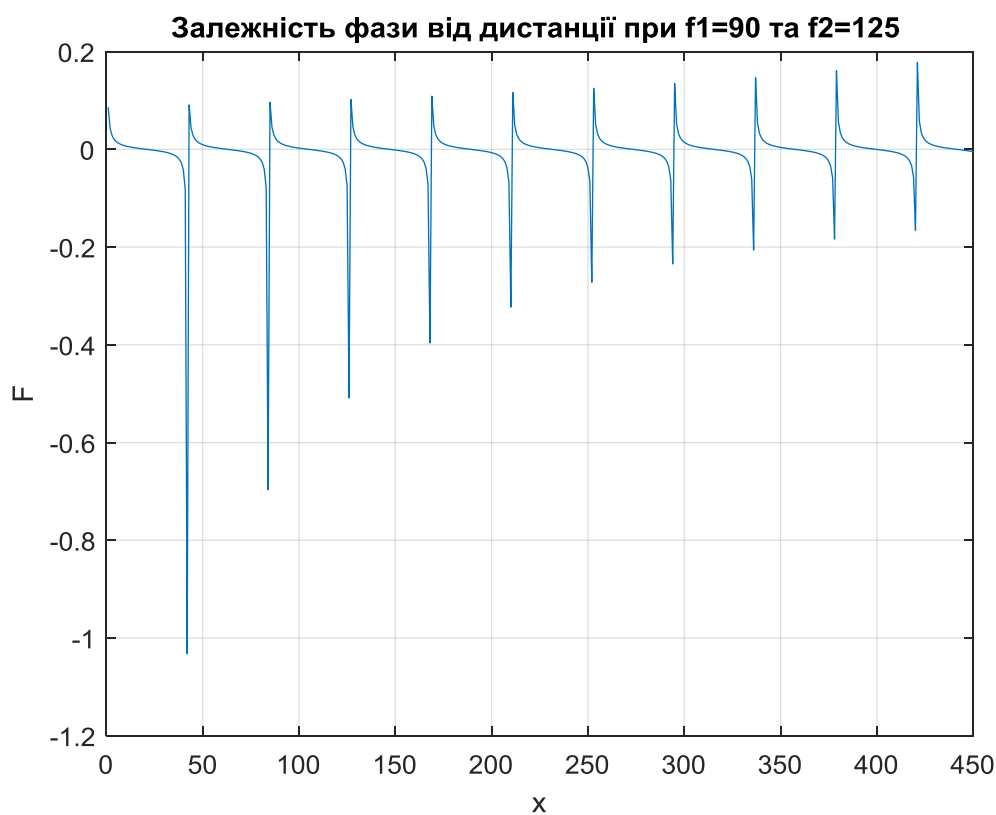


Рис.7. Залежність фази імпедансу z_{nx} від дистанції

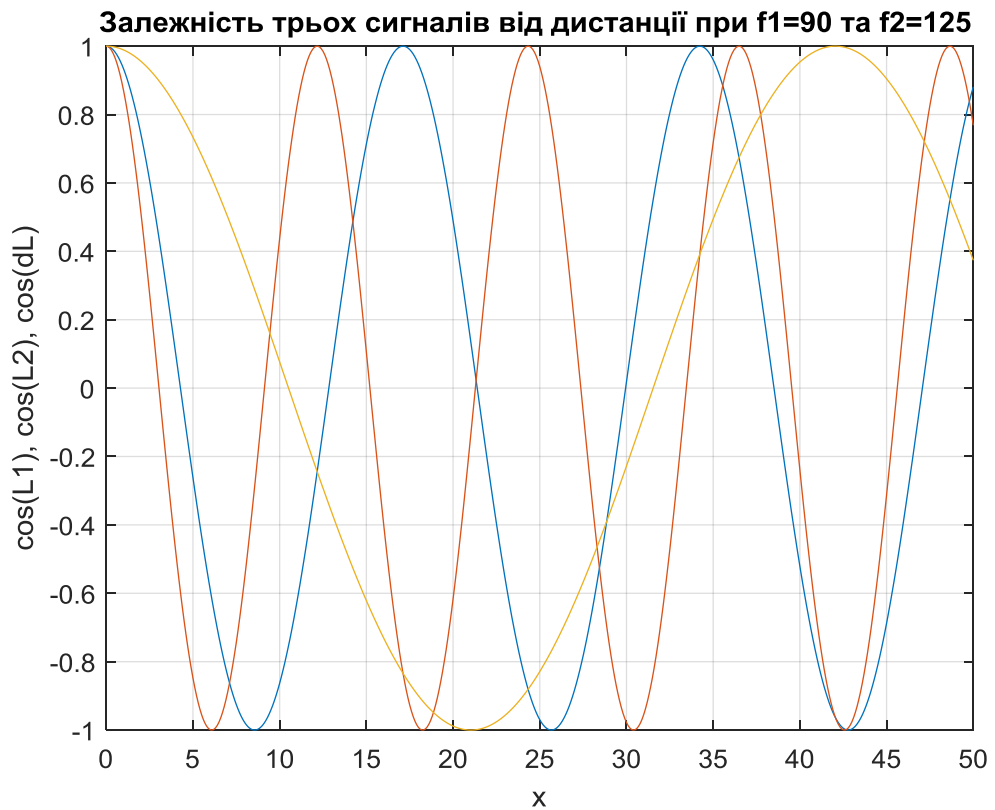


Рис.8. Побудова картини розповсюдження трьох сигналів, окремо кожної частоти (синій та червоний) та спільного (жовтий) вздовж осі Ox

2. Дослідження пари частот $f_1 = 67$ і $f_2 = 79$

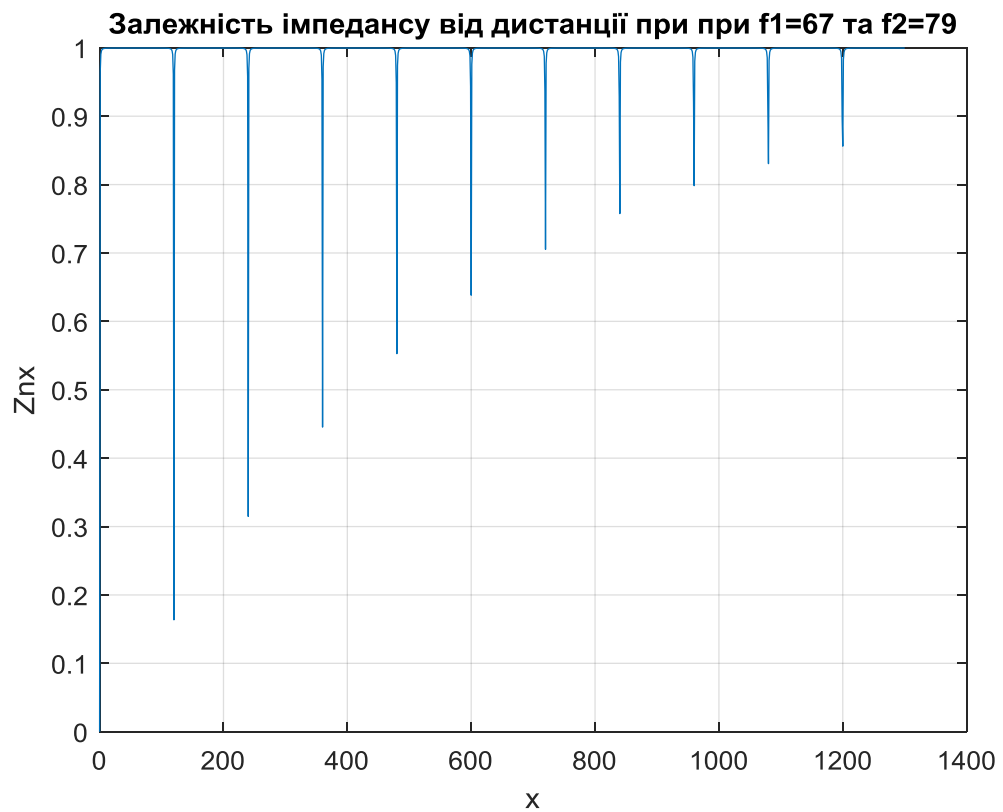


Рис.9. Залежність імпедансу Z_{nx} від дистанції

Залежність дійсної та уявної частини імпедансу від дистанції при $f_1=67$ та $f_2=79$

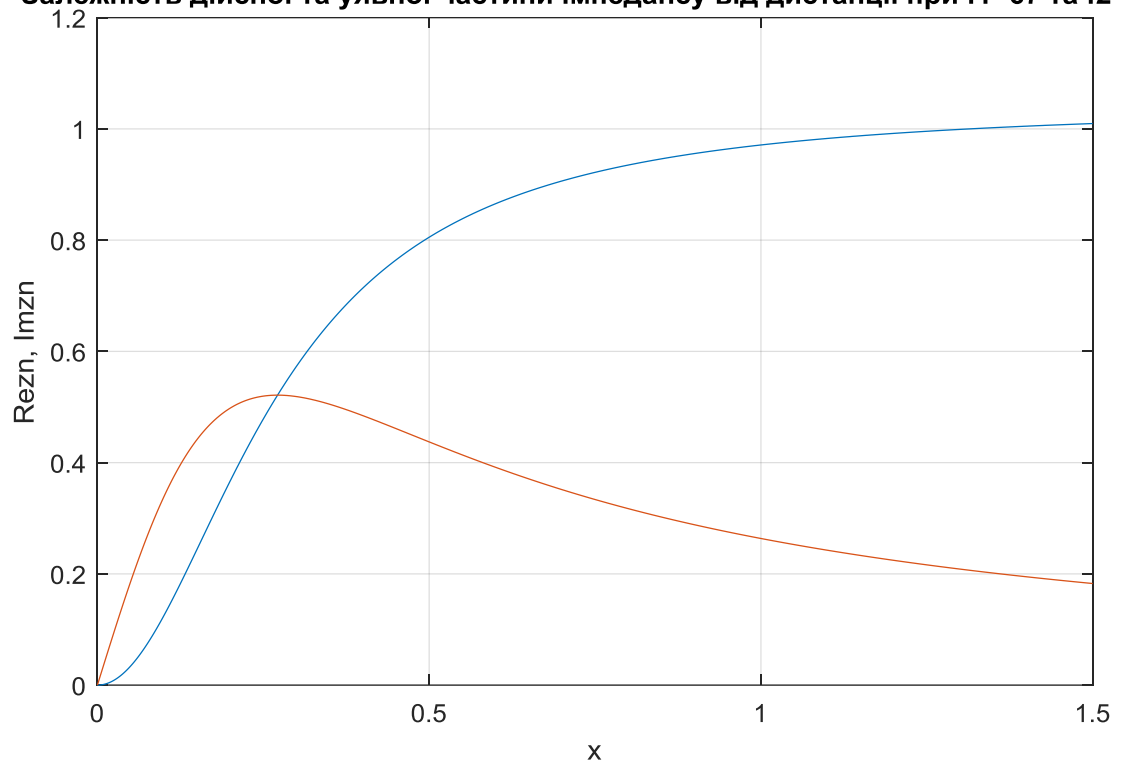


Рис.10. Залежність дійсної (синій) та уявної (червоний) частини імпедансу Z_{nx} від дистанції

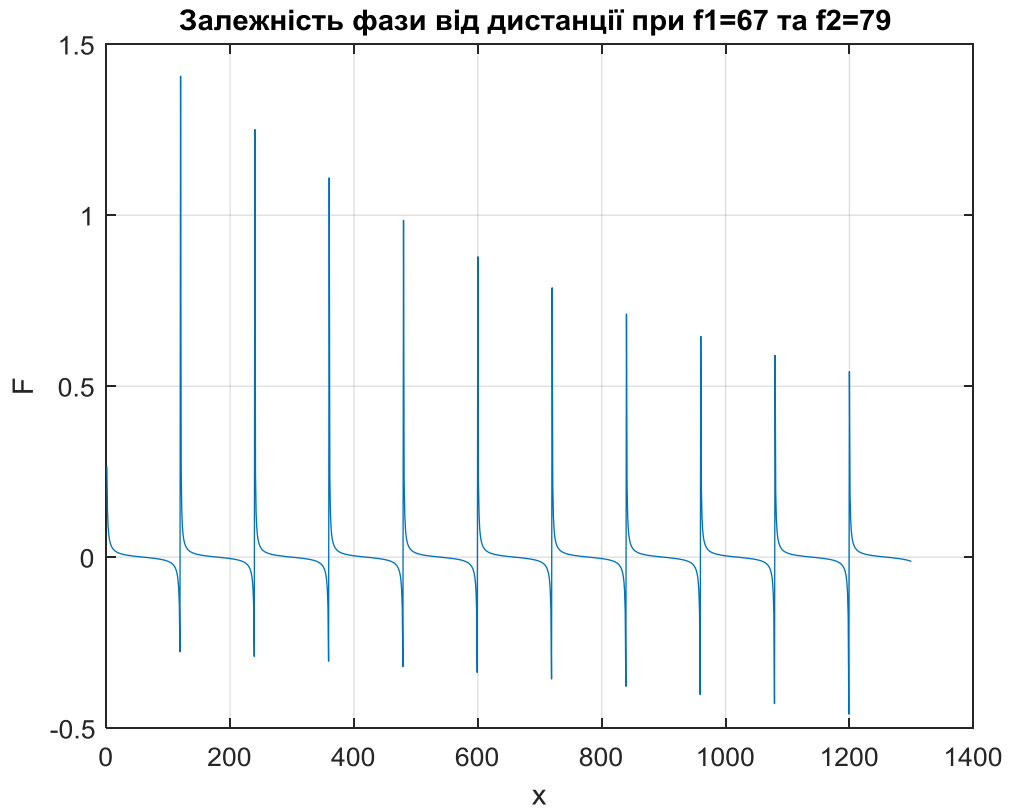


Рис.11. Залежність фази імпедансу Z_{nx} від дистанції

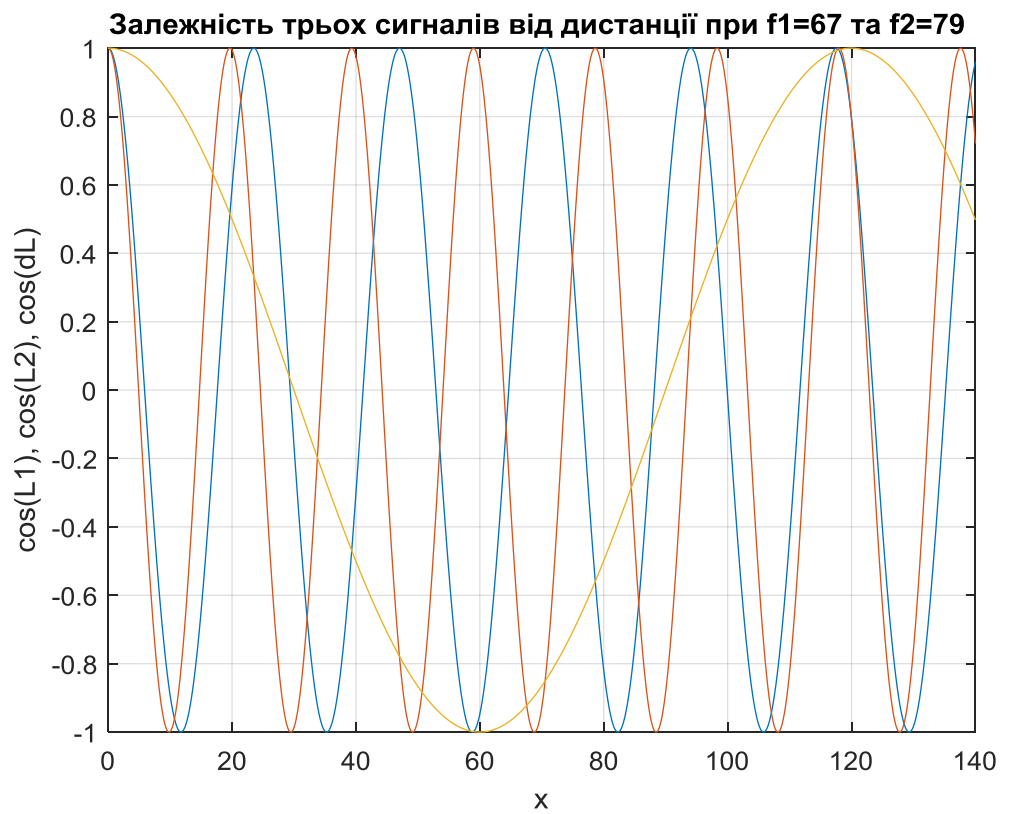


Рис.12. Побудова картини розповсюдження трьох сигналів, окремо кожної частоти (синій та червоний) та спільного (жовтий) вздовж осі Ox

3.3.2. Визначення залежності імпедансних характеристик при зміні висоти хвильоводу

Дослідження буде проведено в два етапи: спершу буде показано як впливає зміна висоти хвильоводу та номера моди на імпеданс Z_{nx} , а потім буде показано як впливає зміна висоти хвильоводу та номера моди на імпеданс Z_{nz} .

Отже побудуємо графіки для імпеданс Z_{nx} :

1. Дослідження пари частот $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$

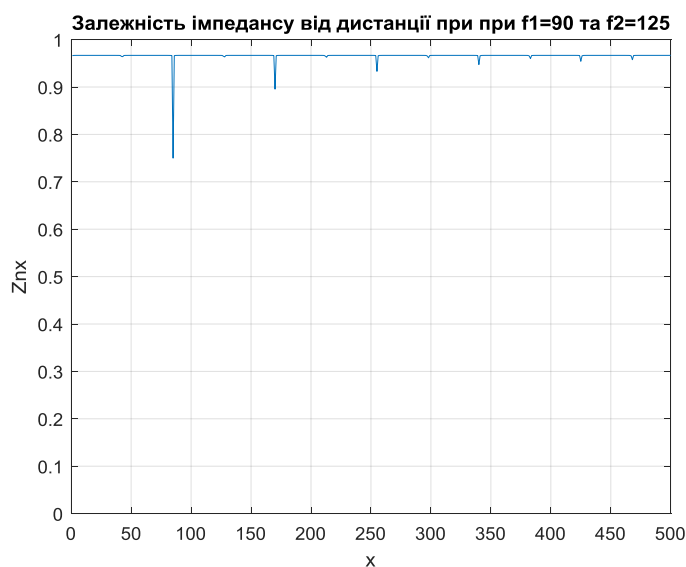
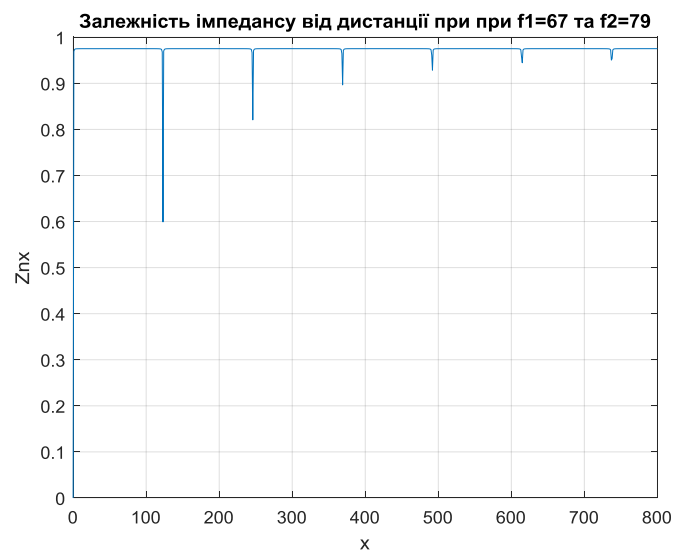
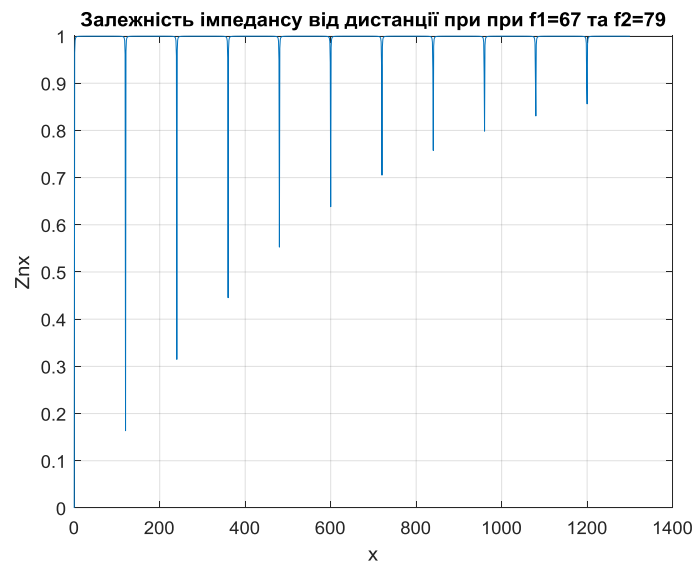




Рис.13. Залежність імпедансу Z_{nx} при зміні висоти хвилеводу

(зверху вниз: $h = 55m$ $h = 85m$ $h = 115m$)

2. Дослідження пари частот $f_1 = 67$ і $f_2 = 79$



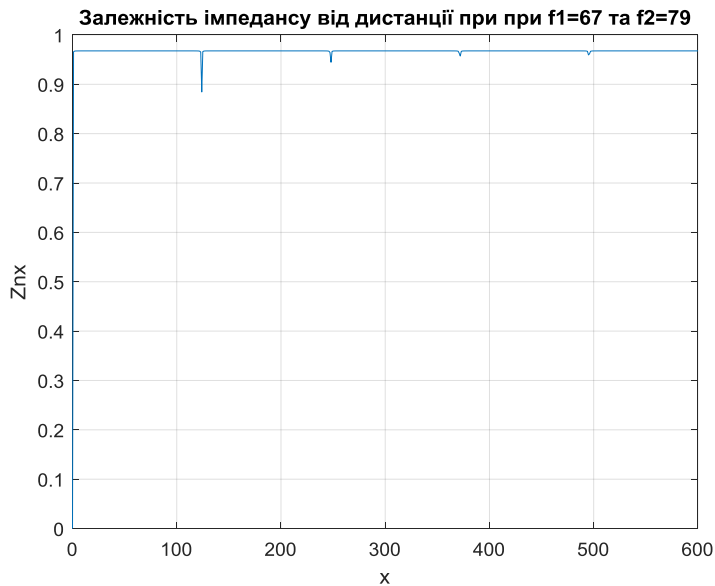


Рис.14. Залежність імпедансу Z_{nx} при зміні висоти хвильоводу
(зверху вниз: $h = 55м$ $h = 85м$ $h = 115м$)

Тепер отримаємо залежність імпедансу Z_{nz} від зміни висоти хвильоводу.
Для наочності на одному графіку будуть показані три побудови при різних h .

1. Дослідження пари частот $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$

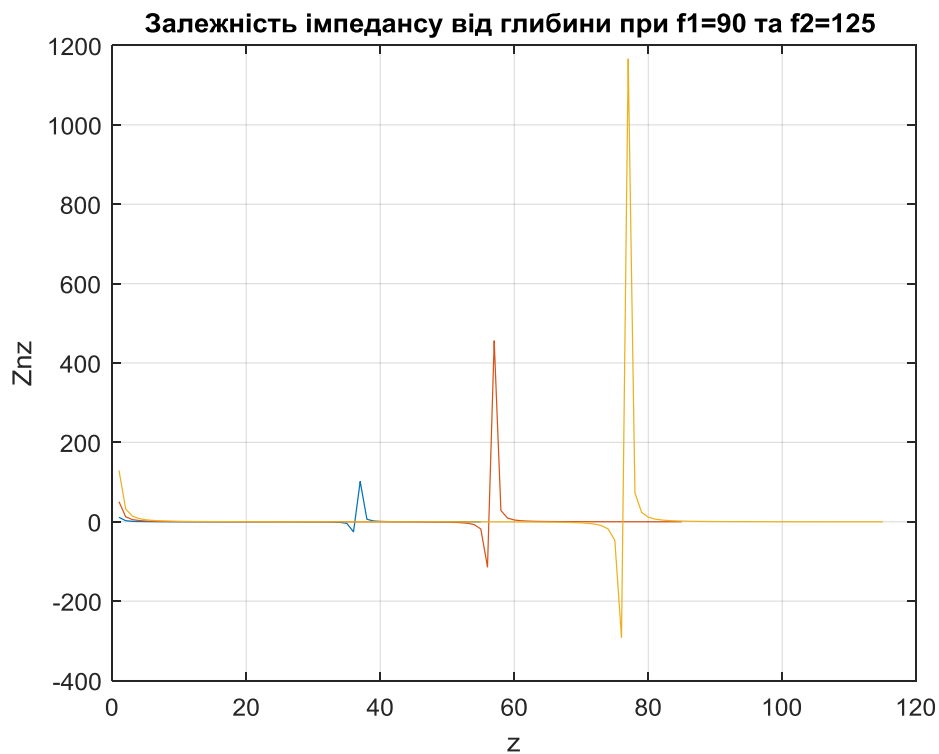


Рис.15. Залежність імпедансу Z_{nz} при зміні висоти хвильоводу
(зліва направо: $h = 55м$ $h = 85м$ $h = 115м$)

2. Дослідження пари частот $f_1 = 67$ і $f_2 = 79$

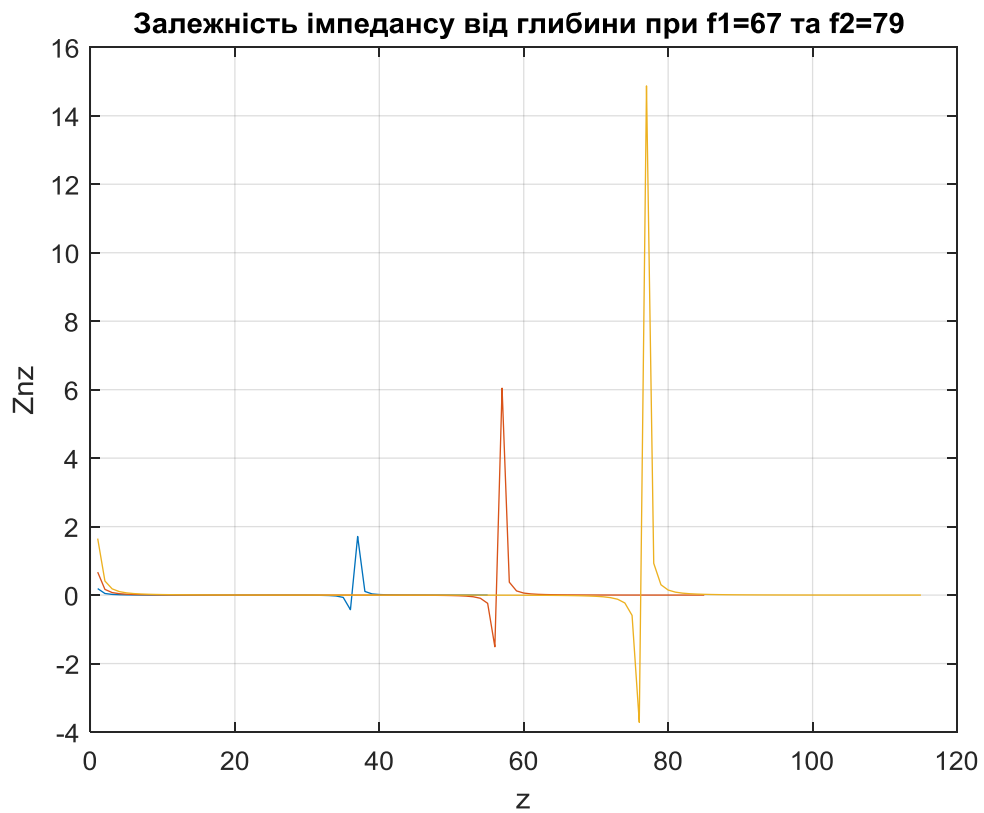


Рис.16. Залежність імпедансу Z_{nz} при зміні висоти хвильоводу

(зліва направо: $h = 55m$ $h = 85m$ $h = 115m$)

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Почергово проаналізуємо отримані результати дослідження:

1) Залежність імпедансу від дистанції

За Рис.5. та Рис.9. можна сказати, що більш низькочастотна пара $f_1 = 67$ і $f_2 = 79$ показує кращі результати по дальності, які дорівнюють 1300 м, в той самий час як пара частот $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$ програє в цьому показнику, доходячи до 450 м. Також більшим є період між «провалами» для пари нижчих частот, який становить 120 м, тоді як у другої пари в три рази менший і дорівнює 42 м. Якщо ж оцінювати глибину «провалів», то за найбільшим з них для кожної пари $f_1 = 67$ і $f_2 = 79$ та $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$, отримаємо результат в 0,84 та 0,5 відповідно, що показує пару частот $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$, як кращий варіант.

2) Залежність дійсної та уявної частини імпедансу від дистанції

Як видно з графіків на Рис.6. та Рис.10. дійсна складова стає більшою за уявну за меншу відстань для пари частот $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$, що пояснюється залежністю її розрахунку від частот та хвильового числа.

3) Графіки фаз (Рис.7. та Рис.11.) за своєю формою є характерними та частково відтворюють форму імпедансу.

4) На графіках (Рис.8. та Рис.12.) можна спостерігати розповсюдження сигналу згідно його частоти. Оскільки різниця між досліджуваними частотами не однакова, то жовта крива, що характеризує спільний сигнал, має більший період в випадку $f_1 = 67$ і $f_2 = 79$ та менший період для $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$.

5) Якщо ж розглядати той самий імпеданс Z_{nx} , але змінюючи висоту

хвильоводу та додавши графіки при $h = 85\text{м}$, $h = 115\text{м}$, то можна спостерігати дуже не однозначні результати щодо дистанції. Адже у випадку $f_1 = 67$ і $f_2 = 79$ (Рис.14.) вона зменшується з 1300м до 800м та

600м, а для випадку $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$ (Рис.13.), навпаки збільшується з 450м до 500м та 1000м, відповідно до висот хвильоводу. Та в обох випадках можна спостерігати зменшення розмірів «провалів», що є позитивною ознакою.

- б) При дослідженні ж імпедансу Z_{nz} та його реакції на зміну висоти хвильоводу (Рис.15. та Рис.16.) можна зазначити, що графіки для різних пар частот не мають суттєвих відмінностей щодо форми. Але при цьому мають величезні розбіжності значень чисельних імпедансу. Так наприклад, на Рис.17. приведено графіки за однакових умов при $h = 55м$ для пари частот $f_1 = 90$ і $f_2 = 125$ синім кольором та для пари частот $f_1 = 67$ і $f_2 = 79$ – жовтим:

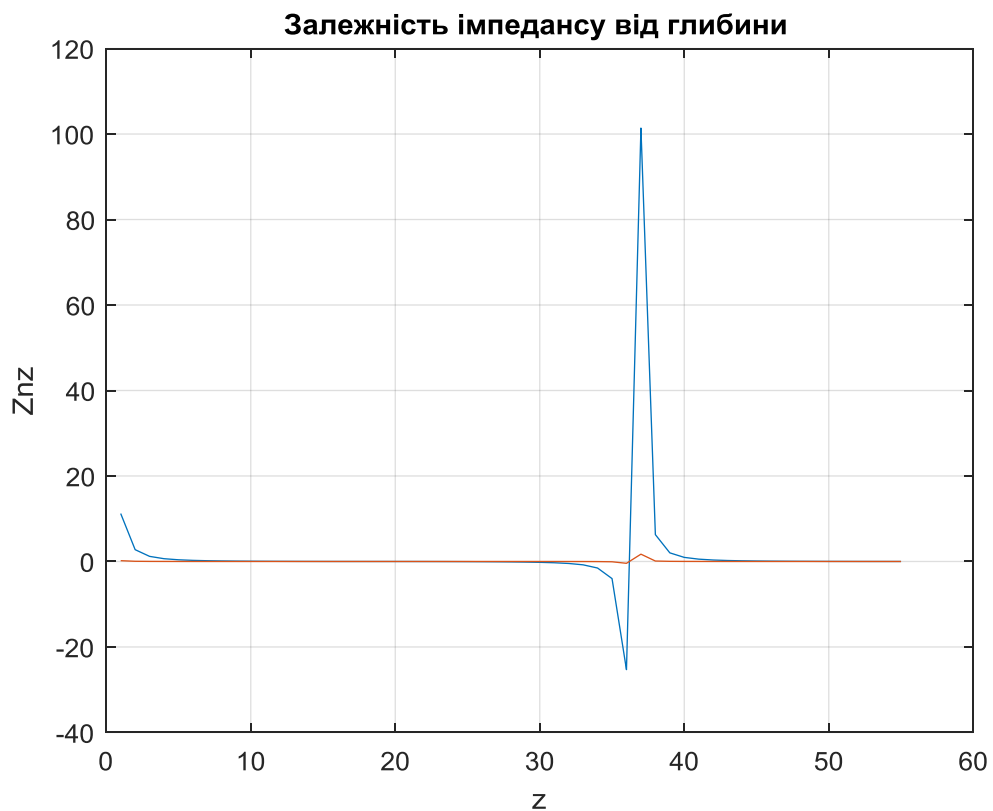


Рис.17. Залежність імпедансу від глибини

Неозброєним оком видно колосальну різницю, що складає близько 60 разів.

ВИСНОВКИ

В ході дослідження поставлена мета, щодо дослідження імпедансних характеристик хвильоводу, що представляє мілке море при озвучуванні робочого середовища двочастотним акустичним сигналом при придставлені сигналу джерела як двочастотних сигналів була реалізована в повному обсязі.

Встановлено, що:

- для сумарного пакету коливань, який складається з двох різночастотних сигналів імпедансні характеристики робочої області показують змінність (збільшення зменшення) значень імпедансу та його залежність від відстані.
- Характер імпедансної залежності від відстані для пари частот f_1 f_2 містить ділянки локальних мінімумів та максимумів значень імпедансу.
- Локальні мінімуми є періодичними за відстанню, і становлять 42м та 120м для обраних умов розрахунку.
- Періодичні локальні мінімуми зменшуються при віддаленні від джерела і на відстаннях 450м та 1300м, відповідно, зникають, а імпедансна залежність від відстані при подальшому просуванні по каналу зникає.
- Таким чином вказаний характер імпедансу хвильовода може корегувати результати виявлення рухомих джерел шуму на дистанціях до 1000м в заданих умовах розрахунку. При цьому вплив відповідатиме короткотривалому зникненні досліджуваного сигналу, що в свою чергу, корегує результати виявлення двочастотного

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M. A. Isakovich, *Obshchaya akustika [General Acoustics]*. Moscow, USSR: Nauka, 1973.
2. M. I. Karnovsky, *Teoriticheskie osnovy gidroakustiki [Theoretical basics of hydroacoustics]*. Kyiv, Ukraine: KPI, 1986.
3. S. M. Rzhevkin, *Kurs lektsiyo teorii zvuka [The course of lectures on the theory of sound]*. Moscow, USSR: MGU, 1960.
4. R. J. Urick *Principles of underwater sound*. Mc Graw-Hill Company, 1975.
5. W. A. Kuperman and J. F. Lynch, *Shallow-Water Acoustics*. Physics Today, October (2004) pp. 55-61.
6. I. Tolstoy and C. S. Clay, *Ocean Acoustics*. Mc Graw-Hill Company, New York, 1966.
7. K. F. Herzfeld and T. A. Litovitz, *Absorption and Dispersion of Ultrasonic*. New York, 1965.
8. I. Malecki I., *Physical foundations of technical acoustics*. Pergamon Press, 1969.
9. L. M. Briechowskich, *Waves in layered media, 2nd Edition*. Academic Press, New York, 1980.
10. E. L. Shenderov, *Wave problems in hydroacoustics*. Sudostroenie Press, Leningrad, 1972.
11. V. T. Grinchenko, I. V. Vovk, V. T. Matsypura, *Osnovy akustiki [Basics of Acoustics]*. Kyiv, Ukraine: IGM NANU, 2009.
12. V. V. Meleshko, V. T. Matsypura, I. A. Ulitko, *Teoriya volnovodov [Waveguide's theory]*. Kyiv, Ukraine: PCC Kyiv University, 2013.
13. G. Grelowska and E. Kozaczka, *Sounding of layered marine bottom - modeling investigations*. Acta Physica Polonica A, 118, 1 (2010) 66-70.
14. E. Kozaczka, G. Grelowska and S. Kozaczka, *Images of the seabed of the Gulf of Gdansk obtained by means of the parametric sonar*. Acta Physica Polonica A, 118, 1 (2010) 91-94.

15. E. Kozaczka, G. Grelowska, W. Szymczak and S. Kozaczka, *The examination of the upper layer of the seabed using acoustic methods*. Acta Physica Polonica A, 119, 6A (2011) 1091-1094.
16. G. Grelowska, E. Kozaczka, S. Kozaczka and W. Szymczak, *Underwater noise generated by a small ship in the shallow sea*. Archives on Acoustics, 38, 3 (2013) 351-356
17. E. Kozaczka, *The Propagation of the Acoustic Disturbances in the Shallow Water*, in *Hydroacoustics of Shallow Water*. eds. E. Kozaczka and G. Grelowska, (Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences, Warszawa, 2013), pp. 31-52.
18. M. Elaisse, F. Garcia-Moliner *Propagation of wave packets and frequency-dependent internal friction*. In Mason`s book. Physical acoustics. Principles and methods. T.5. – M: Mir. 1996. – 332 p.
19. L. Brillouin, *Wave propagation and group velocity*. New York. L.: Acad. Press. 1960 – 154 p.
20. J. W. Strett (Lord Relley.). *Theory of sound*. T. 1. – M.:INTL.1995. – 504 p.
21. A. Sommerfeld *Ein Einwand gegen die Relativtheorie der Elektrodynamik und seine Beseitigung* *Physikalische Zeitschrift* 8:841. 1907. GS:II, 183-184pp.
22. Vainshtaine L. A. *Electromagnet Waves*. – M.: Radio I svias. 1998. – 440 p.
23. Kopeikin V. V. *Refraction of waves in linear media with frequency dispersion*. – M.: Nauka. 2007. – 142 p.
24. M. A. Bulanaya, I. V. Vovk, V. T. Grinchenko, V.T. Matsypura, *Osobennostirasprostraneniya zvukovogo impulse v ploskom regul'yarnom volnovode [Peculiarities of the sound pulse propagation in the planar regular waveguide]*. Acoust. Bull., vol. 11, no. 4, pp. 9-23, 2008.
25. A. O. Bezruchko, V. S. Didkovskyi, M. D. Gladkikh, and O. V. Korzhyk, *Deformatsiya signala s razlichnoy chastotoy impul'snogo koda v podvodnom zvukovom kanale [About deforming multifrequency pulse-coded acoustic signals in the underwater sound channel]*. Inf. Process. Syst., no. 10(135), pp. 12–15, 2015.

26. N. D. Hladkih, O. V. Korzhyk, and V. S. Didkovskyi, *Propagation of sound pulse informational messages in planar wave-guide with ideal boundaries*, Electron. Commun., vol. 21, no. 3, pp. 82–96, Oct. 2016.